Содержание

Введение…… 5
1 Технологическая часть……. 8
1.1 Технология каротажа скважины…… 8
1.2 Технические данные лебедки, требования к электроприводу подъема…… 13
1.3 Технические характеристики каротажной лебедки……. 14
2 Расчетная часть……. 18
2.1 Расчет мощности электродвигателя кабельного барабана……. 18
2.2 Выбор преобразователя частоты……... 23
2.3 Определение параметров силовой части системы ПЧ-АД……. 26
2.3.1 Расчет и выбор элементов выходного фильтра…….. 28
2.3.2 Расчет и выбор элементов сглаживающего фильтра…….. 30
2.3.3 Разработка структурной схемы силовой части……... 31
2.4 Определение структуры, типа и параметров регуляторов электропривода…….. 36
2.5 Синтез и анализ системы векторного управления скоростью с ориентацией по потокосцеплению ротора……. 37
2.6 Исследование электропривода на модели…… 44
2.7 Разработка схемы электрической подключения…….. 48
Заключение…… 54
Список использованных источников…….. 55

Полноту, качество и сроки выполнения геофизических исследований и работ в скважинах (ГИРС) регламентируют "Правила геофизических исследований и работ в нефтяных и газовых скважинах", утвержденные Министерством топлива и энергетики РФ и Министерством природных ресурсов РФ 28 декабря 1999 г., которые предусматривают также основные обязанности и функции недропользователей и производителей ГИРС по обеспечению проведения работ.

Руководящие документы устанавливают для организаций топливно-энергетического комплекса единые требования проведения геофизических исследований и работ в нефтяных и газовых скважинах приборами на кабеле и наземным оборудованием, обеспечивающим цифровую регистрацию данных измерений и сопутствующей информации.

Результаты ГИРС являются одним из основных видов геологической документации скважин, бурящихся для поисков, разведки и добычи нефти и газа. Их применяют для решения геологических, технических и технологических задач, возникающих на всех этапах жизни скважины:

- обеспечения заданных параметров бурения;
- корреляции пробуренных разрезов, оценки литологического состава и стратиграфической принадлежности пород;
- контроля процессов добычи нефти, газа или воды, оценки текущей нефтегазонасыщенности и обводненности коллекторов;
- информационного обеспечения технологий вторичного вскрытия продуктивных пластов, их испытаний и интенсификации дебитов.

Материалы ГИРС составляют информационную основу для подсчета и пересчета запасов нефтяных и газовых залежей и определения степени их выработки. Они обеспечивают геологический, технический и экологический контроль (мониторинг) за эксплуатацией месторождений и отдельных залежей и выполнение природоохранных задач.

Использование электрической энергии на буровых установках способствует повышению технических и экономических показателей производства. Так, себестоимость проходки и эксплуатации скважин при использовании электрического привода на 15−20 % ниже, а скорость проходки выше, чем при использовании дизельного привода. Дальнейшее увеличение добычи нефти, успешное выполнение производственных и экономических задач зависят от технического уровня нефтяной электроэнергетики, от совершенства электроприводов и электрооборудования, используемых в технологических установках. При этом электропривод наиболее просто обеспечивает оценку состояния и исследование скважин с помощью специального оборудования.

Самой распространённой разновидностью геофизического исследования скважин является каротаж. Каротаж представляет собой детальное исследование строения разреза скважины с помощью спуска-подъёма в ней геофизического зонда [1]. Каротаж также применяется при сейсмических исследованиях скважин и земной коры.

Для мониторинга состояния каротажного кабеля и внутрискважинного оборудования каротажные установки оснащаются различными системами контроля и регистрации параметров, таких как системы натяжения кабеля, глубины и скорости передвижения геофизического зонда и др.

Основная часть подобных регистраторов предназначена для сбора и первичной обработки данных, поступающих со скважинной аппаратуры что, позволяет повысить эффективность проведения геофизических работ. Однако введение дополнительных способов наблюдения за состоянием каротажного кабеля и геофизического зонда является актуальной задачей, поскольку обрывы кабеля с последующей потерей внутрискважинного оборудования является распространенной проблемой [4]. Особенно актуальна данная проблема при сейсмических исследованиях, при которых используют газодинамический источник колебаний. Потеря прибора при взрывных работах достигает 50 % случаев.

Электрический привод грузоподъемной лебедки при выполнении ГИРС используется в качестве инструмента мониторинга. В настоящее время большая часть каротажных лебедок оснащается асинхронным частотно-регулируемым электроприводом, содержащим в себе датчики тока, напряжения и энкодер, установленный на барабане лебедки. Такой набор датчиков позволяет вести дополнительный мониторинг каротажного кабеля и не требует дополнительных вложений и изменений в конструкцию лебедки, а требует только программного алгоритма обработки информации, который можно заложить в микропроцессорную систему управления электрическим приводом.

В выпускной квалификационной работе разрабатывается частотно-регулируемый электрический привод грузоподъемной (каротажной) лебедки, используемый в качестве инструмента автоматизации при выполнении ГИРС.

1.1 Технология каротажа скважины

Скважина как объект геофизических исследований оказывает существенное влияние на специфику геофизических методов и технологию их проведения. Скважина позволяет проводить измерения во внутренних точках среды. Вместе с тем ее наличие усложняет структуру изучаемых физических полей, что приводит к серьезным трудностям при решении исследовательских задач.

После завершения бурения и проведения геофизических исследований в открытом стволе, скважину обсаживают стальной колонной и цементируют для укрепления ее ствола и разобщения пластов. Обсадка практически исключает применение электрических, электромагнитных и магнитных методов, и в той или иной степени искажает показания радиоактивных, сейсмоакустических, термических датчиков.

Схема установки для геофизических исследований скважин показана на рисунке 1.1.

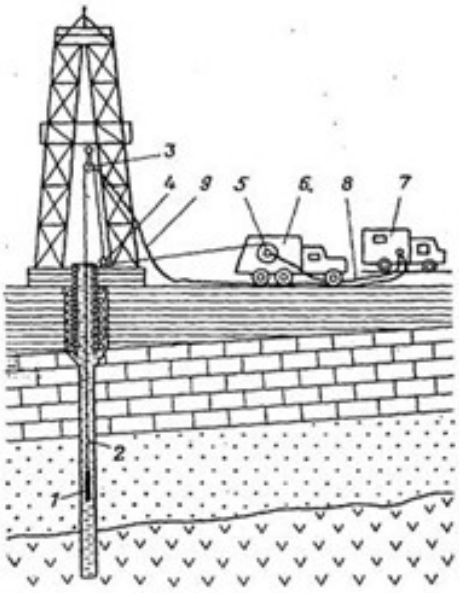


Рисунок 1.1 – Схема установки для исследования скважин

Каротаж представляет собой геофизические методы исследования строения разреза скважины с помощью подъёма в ней геофизического зонда. Для проведения каротажа в скважину на специальном каротажном кабеле спускается каротажный зонд. На земной поверхности с помощью аппаратуры, входящей в комплект каротажной станции, регистрируется информация, поступающая с измерительной установки в процессе перемещения зонда по стволу скважины. Каротажная диаграмма отображает непрерывное изменение физических параметров по стволу скважины в заданном масштабе параметра и глубины [9, 16, 17].

Каротажные работы относятся к геофизическим исследованиям, и их проводят перед гидродинамическими исследованиями скважин в соответствии с рисунка 1.1 [18]. К кабелю 2, намотанному на барабан лебедки 5 подъемника 6, подсоединяется скважинный прибор 1, в котором находятся датчики и электронные узлы. Прибор опускают в скважину через направляющий блок 4 и блок-баланс 3. Выполняя грузонесущие функции, кабель 2 служит также для подачи питания и сигналов управления к скважинному прибору и передачи информации на поверхность. Кабель соединен с геофизической лабораторией 7 через соединительный провод 8. Такой полевой информационно-измерительный комплекс, включающий подъемник и лабораторию, называют каротажной станцией.

При проведении геофизических исследований в относительно неглубоких скважинах обычно используются каротажные станции, объединяющие в единый блок спуско-подъемное оборудование (каротажный подъемник) и каротажную лабораторию, включающую в себя измерительную и регистрирующую аппаратуру, а также источники питания.

Каротажный подъемник станции оборудован лебедкой с электроприводом. Привод лебедки осуществляется через ступенчато- или плавно регулируемый электропривод. На барабане лебедки намотан бронированный трехжильный каротажный кабель, нижний конец которого имеет стандартный кабельный наконечник, предназначенный для механического и электрического соединения кабеля с каротажными зондами и

скважинными приборами, оборудованными в своих верхних частях соответствующими стандартными головками. Равномерная укладка кабеля на барабан лебедки, при подъеме скважинного прибора, обеспечивается автоматическим кабелеукладчиком, работа которого, в случае необходимости, подправляется ручным коллектором.

Для определения глубины, на которой находится скважинный прибор, каротажный кабель размечается, т. е. на него через равные интервалы (обычно – 20 метров) наносятся метки, магнитные или вещественные. Магнитные метки представляют собой намагниченные участи кабеля. Вещественные – небольшие бандажи из изоляционной ленты, накладываемые на кабель. Для более надежной привязки к глубинам метки, кратные 100 метрам, делаются отличными от рядовых.

Считывание магнитных меток осуществляется с помощью датчика магнитных меток глубины (ДМГ), который формирует электрический сигнал «глубина-метка» в момент прохождения мимо него намагниченного участка кабеля. Вещественные метки контролируются визуально, при этом в момент их прохождения между роликами кабелеукладчика на диаграммной ленте ставится метка.

Верхний конец каротажного кабеля заправляется внутрь барабана лебедки и подключается к смонтированному на его вале коллектору, обеспечивающему электрическое соединение жил кабеля с измерительным оборудованием каротажной станции. Корпус коллектора закреплен на раме лебедки, а его вращающаяся часть крепится к валу. Жилы каротажного кабеля подключаются к клеммам на вращающейся части коллектора, а соединительный кабель с каротажной лаборатории (т. н. коллекторный провод) – к клеммам на его корпусе. Электрическое соединение жил каротажного кабеля с соответствующими жилами коллекторного привода осуществляется с помощью находящихся внутри коллектора металлических колец и прижимающихся к ним щеток.

Для проведения каротажа станцию устанавливают на расстоянии 10…20 метров от устья скважины так, чтобы ось лебедки была горизонтальна и

перпендикулярна к направлению на устье, и при необходимости затормаживают, подкладывая под колеса клинья (рисунок 1.1).

Над устьем скважины надежно закрепляется блок-баланс таким образом, чтобы плоскость его колеса была перпендикулярна оси барабана лебедки и направлена на его середину, а пропущенный через блок-баланс кабель свободно опускался в устье скважины.

С осью блок-баланса соединяют механический и электронный датчики глубин, а на его раме, вблизи каротажного кабеля, размещают ДМГ. ДМГ и электронный датчик глубин соединяются кабелями со станцией. Станция надежно заземляется и только после этого разматывается и подключается сетевой провод.

Затем к каротажному кабелю подключается скважинный прибор (или зонд) и после проведения необходимых операций (эталонирование, запись стандарт-сигналов и т.п.), он опускается на несколько метров в устье скважины, после чего лебедка ставится на тормоз. На счетчиках глубин устанавливают нулевые показания, тормоз отпускается и начинается спуск скважинного прибора в скважину.

Скорость спуска не должна превышать 10 000 м/ч, она регулируется торможением барабана лебедки, которое производится плавно, без рывков. Процесс спуска контролируется и немедленно замедляется или вовсе прекращается в случае резкого провисания кабеля, что обычно свидетельствует об остановке скважинного прибора или его торможении.

Спуск прекращается сразу по достижении скважинным прибором забоя и лебедка ставится на тормоз. В любом случае на барабане лебедки должно оставаться не менее половины последнего ряда витков. Перепуск кабеля может привести к аварии в результате его складывания и образования петель. При прохождении башмака (нижнего конца) обсадной колонны и других технических опасных интервалов, к которым относятся резкие изменения диаметра скважины, обрезки металлических труб и пр., скорость спуска уменьшают.

Большинство каротажных исследований выполняется при подъеме скважинного прибора, для чего переключают режимы работы лебедки со спуска на подъем и включают ее привод. Сразу после отрыва скважинного прибора от забоя, регулируя возбуждение двигателя, устанавливают требуемую скорость подъема, которая в основном определяется техническими характеристиками используемой аппаратуры и решаемыми задачами.

С приближением скважинного прибора к устью, скорость подъема снижается до минимальной и внимательно отслеживаются показания счетчиков глубин и предупредительная метка.

При появлении предупредительной метки, которая устанавливается на расстоянии около 10 м от конца кабеля и должна быть хорошо видимой, лебедка останавливается и скважинный прибор извлекается из устья вручную. После проведения необходимых операций, как правило, аналогичных выполняемым перед спуском, аппаратура отключается, а скважинный прибор отсоединяется.

Для привязки результатов измерений к глубинам, необходимо знать расстояние от роликов кабелеукладчика до поверхности земли у устья скважины («мертвый замер» - $Н_{мз}$ на рисунке 1.1) и цену деления первой метки ($Н_{ц.м.п}$) – расстояние от точки записи СП (зонда) до метки, от которой отмерялись расстояния при разметке кабеля.

Перед проведением исследований бурение прекращают и буровой инструмент извлекают из скважины. Вместе с тем все большее распространение получают исследования скважин в процессе бурения.

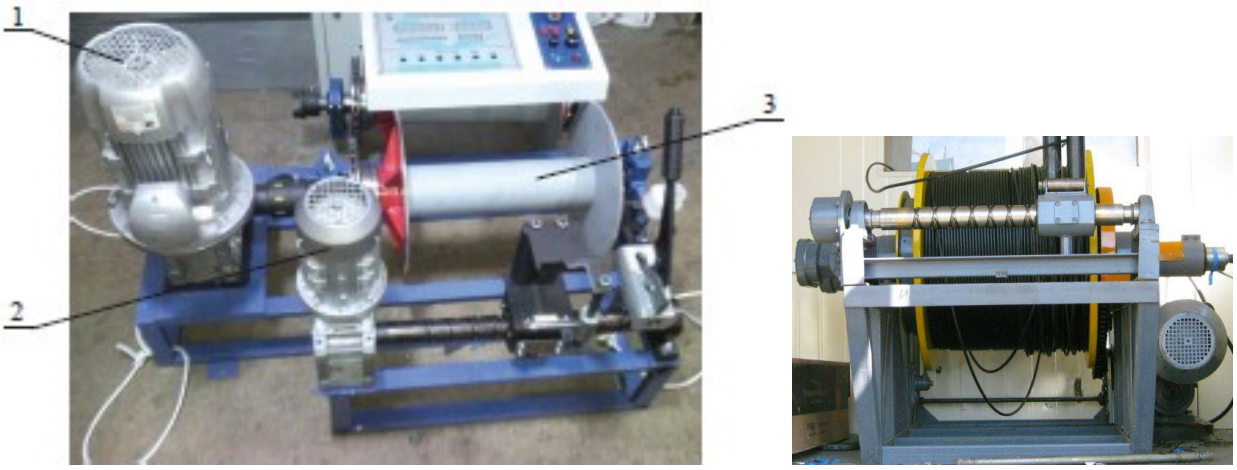
Таким образом назначением и областью применения каротажной лебедки является проведение спускоподъемных операций в процессе геофизических исследований в газовых и нефтяных скважинах глубиной до 5000 м геофизическим кабелем или проволокой различного диаметра.

При этом решаются основные задачи обеспечения заданных техническими требованиями скоростей и усилий в рабочих режимах спусков и подъёмов скважинной аппаратуры и оборудования, а также механизация и частичная автоматизация процесса работ.

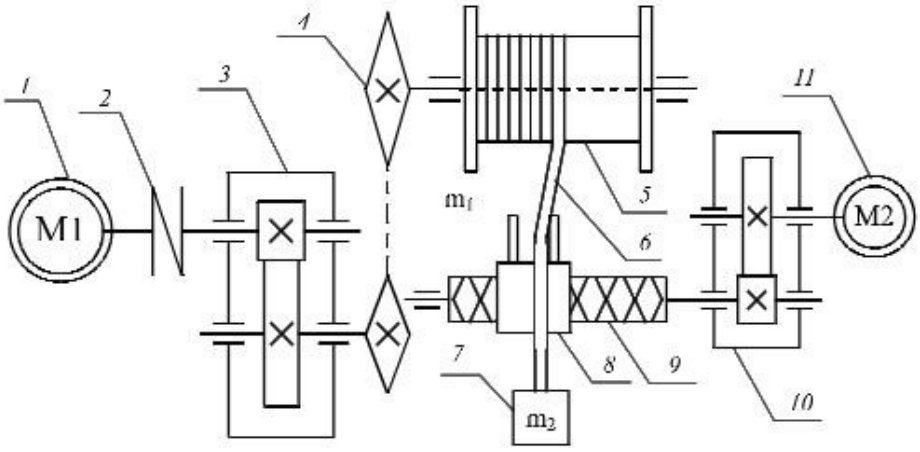
1.2 Технические данные лебедки, требования к электроприводу

подъема

Лебёдка с электроприводом ЛПК предназначена для проведения спускоподъемных операций в процессе геофизических исследований в газовых и нефтяных скважинах глубиной до 5 000 м геофизическим кабелем (или проволокой) различного диаметра. Общий вид лебедки представлен на рисунке 1.2, кинематическая схема – на рисунке 1.3.



1 –электрический привод лебедки с асинхроннымдвигателем и редуктором;
2 – электрический привод кабелеукладчика;
3 – барабан для намотки каротажного грузонесущего кабеля
Рисунок 1.2 - Общий вид каротажной лебедки



1 – электродвигатель привода подъема; 2 – муфта упругая;
3 – редуктор привода подъема; 4 – цепная передача; 5 – барабан;
6 – кабель; 7 – геофизический зонд; 8 –каретка; 9 – винтовой вал;
10 – редуктор привода кабелеукладчика;
11 – электродвигатель привода кабелеукладчика
Рисунок 1.3 – Кинематическая схема каротажной лебедки
С помощью каротажной лебедки решаются следующие задачи:

- обеспечение заданных техническими требованиями скоростей и усилий в рабочих режимах спусков и подъёмов скважинной аппаратуры и оборудования;

- механизация и частичная автоматизация процесса работ.

1.3 Технические характеристики каротажной лебедки

Лебедка к подъемнику каротажному с электроприводом (далее - лебедка ЛПК, таблица 1.1) с асинхронным двигателем на 220 или 380 В, содержит в своём составе лебёдку и систему управления лебёдкой и контроля каротажа.

Питание электродвигателя каротажной лебедки осуществляется от внешнего источника переменного тока напряжением 220 или 380 В и частотой 50 Гц (промышленная сеть или дизель-генератор).

В состав лебёдки каротажной входят:

- рама;

- сменные барабаны (под кабель/проволоку) с возможностью быстрой замены;

- коллектор воздушный, щёточный типа КГ-4М (для лебедки под кабель);

- кабелеукладчик (проволокоукладчик) с измерительной системой, включающей в себя датчик меток глубин, механический счетчик глубин (дублер), датчик натяжения, датчик шагов квантования;

- тормозная система: два ленточных тормоза с ручным приводом;

- мотор-редуктор с электродвигателем;

- частотный преобразователь 220 или 380 В, 50 Гц.

- пульт управления лебедкой и контроля каротажа.

Таблица 1.1 – Технические данные каротажной лебедки

Диаметр используемого геофизического кабеля (проволоки), мм	6,3

Максимальная глубина исследования, м, не менее	2 000
Диапазон скоростей движения кабеля (проволоки) на среднем диаметре намотки на барабан лебедки, м/ч	20-2 000
Тяговое усилие кабеля (проволоки) на первых двух рядах намотки на барабан лебедки при максимальной скорости движения, Н, не менее	11 862
Мощность на барабане лебедки, кВт	4,95
Максимальный крутящий момент на барабане лебедки, кНм	1,77
Потребляемая мощность, кВт	5,5
Габаритные размеры, мм:	
- длина	1 380
- ширина	1 160
- высота	750
Масса лебедки, кг	250

В систему управления и контроля каротажа входят:

- устройство для контроля скорости движения геофизического кабеля (проволоки), глубины спуска прибора в скважину, натяжения кабеля (проволоки), измеряемые параметры отображаются на световых цифровых индикаторах;

- устройство задания граничных величин натяжения.

- органы управления лебёдкой.

Система управления лебедкой обеспечивает возможность блокировки движения приборов при заданных значениях натяжения и глубины в требуемом интервале в ручном и автоматическом режиме.

Система управления лебедкой снабжается устройством звуковой световой сигнализации, аварийной остановки (отключение сети) при достижении нулевой отметки и/или программируемых значений по глубине, а также при достижении усилия на датчике натяжения заданной величины.

На каротажной лебедке используется специализированный кабель типа КГ (или проволока с подвешенным прибором). Кабель выполняет функцию троса, на котором удерживается вес прибора, опускаемого в скважину, и функцию электропитания геофизического зонда.

Каротажная лебедка (рисунок 1.2, 1.3) представляет собой механизм подъема с многослойной навивкой грузонесущего кабеля на барабан, в связи с этим укладке кабеля на барабан уделяется особое внимание. Она осуществляется с помощью двух вертикально установленных направляющих

роликов. Направляющие ролики перемещаются кареткой с помощью реверсивного винтового вала с прямоугольной резьбой. В процессе работы должна быть обеспечена синхронизация кабелеукладчика с барабаном лебедки. Лебедка оснащена двумя ленточными тормозами, охватывающими полуокружности обеих реборд бочки барабана.

Особенности работы лебедки. В случае несогласования скорости работы кабелеукладчика с частотой вращения барабана лебедки происходит некорректная укладка кабеля на барабан. В процессе подъема прибора при завышенной скорости работы кабелеукладчика происходит разреженная укладка кабеля, что негативно скажется на следующем слое и при дальнейшей укладке кабеля.

При пониженной скорости вращения кабелеукладчика происходит поджатие витков кабеля и очередной виток кабеля укладывается внахлёст с предыдущим витком. В большинстве случаев, если на хлёст вовремя не устранен, происходит срыв нахлёстанного витка на место. При этом кабель сначала провисает, усилие натяжения уменьшается до нуля, затем резко восстанавливается до прежнего значения, что приводит к большим динамическим ударам, затухающим во времени. Это нарушает нормальную работу электропривода, что сказывается на долговечности работы всего оборудования каротажной лебедки. Частичное или полное устранение динамических ударов при срыве нахлёстанных витков наматываемого кабеля является актуальной задачей [3-5].

Линейная скорость v проведения каротажа находится в диапазоне от 50 до 3 000 м/час или от v_{min}=0,014 м/с до v_{max}=0,83 м/с и зависит от методов геофизических исследований в скважине [6]. Минимальная или максимальная скорость вращения барабана также зависит от числа слоев кабеля на барабане. Необходимо, чтобы электропривод обеспечивал минимальную скорость подъема, при максимальном числе слоев каротажного грузонесущего кабеля на барабане, и максимальную скорость подъема, при наименьшем числе слоев кабеля.

Для приведенных ранее параметров каротажного подъемника эти условия выполняются при следующих угловых скоростях вращения двигателя: $\omega_{дmin}$ = 3,083 рад/с и $\omega_{дmax}$ = 312,12 рад/с. Диапазон регулирования скорости двигателя *v* будет равен $D = \omega_{дmax}/\omega_{дmin} = 101,2$.

2.1 Расчет мощности электродвигателя кабельного барабана

Примем за исходные данные следующие параметры и условия работы каротажной лебедки:

$d_б$=0,5 м; $d_к$=0,0102 м; $l_б$=0,96 м;

$L_к$=3 500 м; $m_{к.у}$=0,422 кг/м; $V_{г.п}$=0,0254 кг/м^3;

$m_{г.п}$=120 кг; $i_п$=30,735 о.е.; $\eta_п$=0,84 о.е.

$\rho_{с.ж}$=1 000 кг/м3, $\rho_{с.ж}$=1 730 кг/м^3,$\rho_{с.ж}$=2 200 кг/м^3).

Диаметр намотки кабеля на барабан рассчитаем относительно числа слоев N=1,2,3,… каротажного грузонесущего кабеля на барабане, начиная с пустого барабана:

$$d_{к.б.}(N) = d_б + (2N - 1)d_к, \qquad (2.1)$$

где $d_б$ – диаметр барабана;

N=1,2,3…;

$d_к$ – диаметр каротажного грузонесущего кабеля, м.

Остаточная длина каротажного грузонесущего кабеля, намотанного на барабан

$$L_{к.б}(N) = w\pi\left(Nd_б + N^2 d_k\right), \qquad (2.2)$$

где $w = l_б/d_к$ – число витков кабеля в одном слое намотки;

$l_б$ – длина барабана, м.

Сила тяги, создаваемая барабаном для геофизического прибора, находящегося в сухой скважине:

$$F_{тс}(N) = \left[(L_к - L_{к.б}(N))m_{к.у}\right]g + m_{г.п}g\ , \qquad (2.3)$$

где $L_к$ – полная длина каротажного грузонесущего кабеля, м;

$m_{к.у}$– масса удельная каротажного грузонесущего кабеля, кг/м;

$m_{г.п}$– масса геофизического прибора, кг;

g – ускорение свободного падения, м/с^2.

Сила тяги, создаваемая барабаном для геофизического прибора, находящегося в скважине, заполненной жидкостью или буровым раствором:

$$F_{тв}(N)=\left[(L_к - L_{к.б}(N))(m_{к.у} - s_к \rho_{с.ж})\right]g+(m_{г.п} - V_{г.п}\rho_{с.ж})g\ , \qquad (2.4)$$

где $s_к=\pi d_к^2/4$ – площадь поперечного сечения каротажного грузонесущего кабеля, м^2;

$V_{г.п}$– объем геофизического прибора, м^3;

$\rho_{с.ж}$– плотность скважинной жидкости (бурового раствора), кг/м^3.

Так как геофизические исследования в скважинах в основном производятся при подъеме геофизического прибора, то момент сопротивления, приведенный к валу двигателя, при статической нагрузке:

$$M_c(N)=\frac{F_m(N)d_{к.б}(N)}{2i_п\eta_п}, \qquad (2.5)$$

где $i_п$ – общее передаточное число от вала электродвигателя к барабану намотки каротажного грузонесущего кабеля;

$\eta_п$ – к.п.д. кинематической цепи, учитывающий потери в редукторе, цепной передаче, подшипниках качения и трение в блоках.

На рисунке 2.1 приведены графики момента сопротивления, создаваемого геофизическим прибором в сухой скважине $M_с$ (N) (кривая 1), и момента сопротивления, создаваемого геофизическим прибором в скважине, заполненной буровым раствором:

- кривая 2 – $\eta_{с.ж}$ = 1 000 кг/м^3,

- кривая 3 – $\eta_{с.ж}$ = 1 730 кг/м^3,

- кривая 4 – $\eta_{с.ж}$ = 2 200 кг/м^3), от числа слоев каротажного грузонесущего кабеля на барабане.

Анализ полученных зависимостей $M_с$(N) показывает, что учет особенностей работы геофизического прибора в буровом растворе существеннонижает статический момент сопротивления, приведенный к валу двигателя, и, как следствие, установленную мощность двигателя.

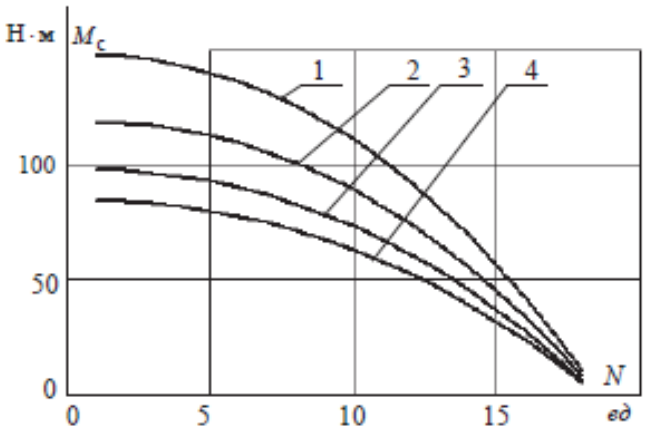


Рисунок 2.1 - Зависимость статического момента сопротивления от слоя N каротажного грузонесущего кабеля на барабане

Линейная скорость проведения каротажа находится в диапазоне от 50 до 3 000 м/час или отv_{min}=0,014 м/с до v_{max}=0,83 м/с и зависит от методов геофизических исследований в скважине. Минимальная или максимальная скорость вращениябарабана также зависит от числа слоев кабеля набарабане. Необходимо, чтобы электропривод обеспечивал минимальную скорость подъема, при максимальном числе слоев каротажного грузонесущего кабеля на барабане, и максимальную скоростьподъема, при наименьшем числе слоев кабеля.

Для приведенных ранее параметров каротажного подъемника эти условия выполняются приследующих угловых скоростях вращения двигателя: $\omega_{дmin}$ = 3,083 рад/с и $\omega_{дmax}$ = 312,12 рад/с. Диапазон регулирования скорости двигателя D = $\omega_{дmax}/\omega_{дmin}$ = 312,12/3,083=101,2, что определяет способ регулирования скорости асинхронного двигателя – векторное управление.

Одновременно с изменением момента сопротивления на валу двигателя изменяется и эквивалентный момент инерции электропривода каротажного подъемника, приведенный к валу двигателя:

$$J_{\Sigma} = k_{ny} J_{д} + \frac{J_{б}(N)}{i_n^2} + m_{к.г}(N)\rho^2(N),$$

(2.6)

где $k_{пу}$ = 1,05…1,3 – коэффициент, учитывающий момент инерции соединительной муфты и первой шестерни редуктора электропривода;

$J_д$ – момент инерции двигателя, кг·м^2;

$J_б(N)$ – момент инерции барабана с N слоями кабеля, кг·м^2;

$$m_{к.г}(N)=\left(L_к - L_{к.б}(N)\right)m_{к.у}+m_{г.п}\ , \qquad (2.7)$$

– масса геофизического прибора с кабелем в сухойскважине или

$$m_{кг}(N)=\left(L_к - L_{кб}(N)\right)\left(m_{ку}+s_K\rho_{с\,ж}\right)+\left(m_{гп}+V_{гп}\rho_{с\,ж}\right), \qquad (2.8)$$

– масса геофизического прибора с кабелем в скважине, заполненной жидкостью или буровым раствором, кг;

$\rho = v(N)/\omega_{дв}(N)$ – радиус приведения геофизического прибора с кабелем в скважине к валу двигателя, м/рад;

$v(N)$ – линейная скорость геофизического прибора в скважине, м/с;

$\omega_{дв}(N)$ –угловая скорость двигателя при N слое кабеля набарабане, рад/с.

При подъеме геофизического прибора радиус приведения

$$\rho=\frac{v(N)}{\omega_{дв}(N)}=\frac{\omega_{бар}(N)\cdot\frac{d_{к.б}(N)}{2}}{\omega_{дв}(N)}=\frac{d_{к.б}(N)}{2i_n}, \qquad (2.9)$$

где $\omega_{бар}(N)$ – угловая скорость барабана при N слое кабеля на барабане, рад/с.

Тогда (1) преобразуется к виду (2):

$$J_\Sigma=k_{пу}J_д+\frac{J_{бп}+\left[\frac{d_б^2+d_{кб}^2(N)}{8}L_{кб}(N)m_{ку}\right]}{i_n^2}+m_{кг}(N)\left(\frac{d_{кб}(N)}{2i_n}\right)^2 \qquad (2.10)$$

На рисунке 2.2 приведены графики суммарного момента инерции электропривода, приведенного к валу двигателя, для геофизического прибора в сухой скважине $J_\Sigma(N)$ (кривая 1) и момента инерцииэлектропривода в скважине, заполненной буровым раствором (кривая 2 – $\rho_{с.ж}$=1 000 кг/м^3, кривая 3 –$\rho_{с.ж}$=1 730 кг/м3, кривая 4 – $\rho_{с.ж}$=2 200 кг/м3), от числа слоев N каротажного грузонесущего кабеля на барабане.

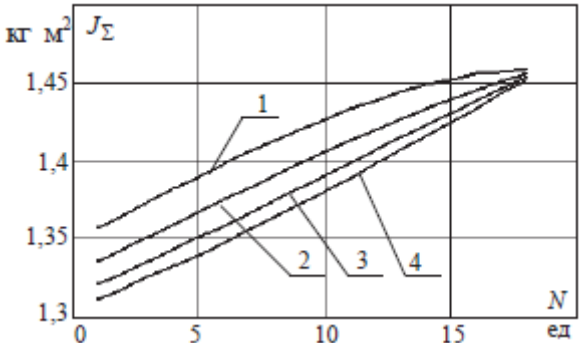


Рисунок 2.2 –Зависимость момента инерции электропривода J_Σ от слоя N каротажного грузонесущего кабеля на барабане

Анализ графиков показывает, что суммарный момента инерции электропривода J_Σ, приведенный к валу двигателя, незначительно изменяется как от числа слоев N каротажного грузонесущего кабеля на барабане, так и от плотности бурового раствора $\rho_{с.ж}$. Это объясняется, в первую очередь, большим передаточным числом от вала электродвигателя к барабану намотки каротажного грузонесущего кабеля и малым радиусом приведения поступательно движущихся элементов – геофизического прибора с кабелем в скважине.

Незначительные изменения момента инерции электропривода, приведенного к валу двигателя, позволяют выполнить асинхронный частотно-регулируемый электропривод подъемника с векторным регулированием скорости, а его регулятор скорости – с постоянным коэффициентом усиления.

Система управления асинхронным электроприводом с преобразователем частоты, обеспечивающая диапазон регулирования скорости D = 1:100,может быть построена с модальным или подчиненным [13–17] регулированием. Несмотря на высокое быстродействие электроприводов с модальным регулятором [11], при выполнении электроприводов каротажных подъемников предпочтение следует отдавать системам подчиненного регулирования [13, 7], которые обеспечивают простоту настройки регуляторов промышленных электроприводов, особенно при необходимости добавления дополнительного контура регулирования линейной скорости подъемника.

Функциональная схема асинхронного электропривода каротажного подъемника с векторным регулированием скорости приведена на рисунке 2.3.

На функциональной схеме рисунок 2.3 приняты следующие обозначения: М – трехфазный асинхронный двигатель; ПЧ – двухзвенный преобразователь частоты с автономным инвертором напряжения; РП – регулятор потокосцепления; РС – регулятор скорости; РТ – регулятор тока; ПКП – преобразователь координат прямой; ПКО – преобразователь координат обратный; Б – барабан; МР – мерный ролик; ГП – геофизический прибор; BR – датчик скорости; ИДП – импульсный датчик положения.

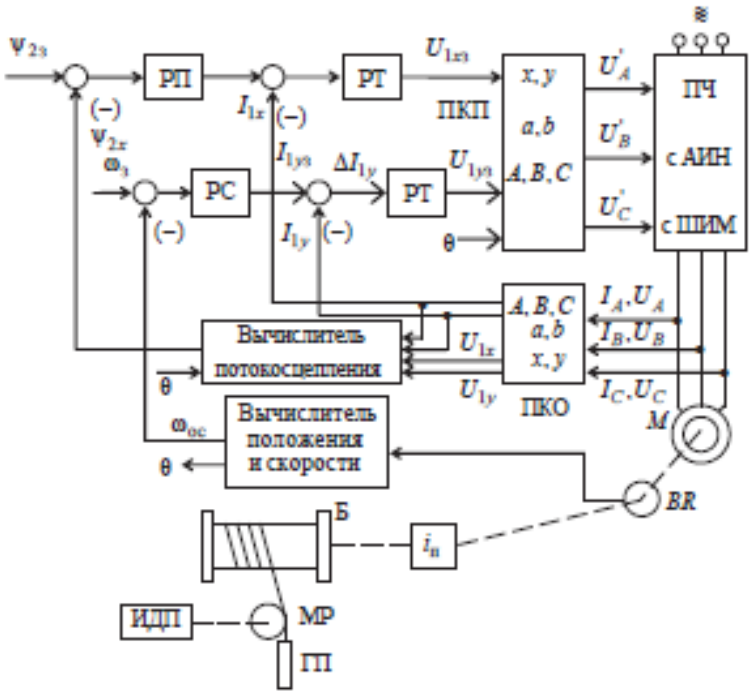


Рисунок 2.3 –Функциональная схема асинхронного электропривода каротажного подъемника с векторным регулированием скорости

Мощность асинхронного электродвигателя кабельного барабана будет равна при максимальном моменте на его валу и максимальной скорости

$P = M_c \cdot \omega_{дmax}$; $P = 150 \cdot 312 = 46\,800$ Вт.

Выбираем двигатель 4А225М2У3 P = 55 кВт, $\omega_0 = 314$ $с^{-1}$.

2.2 Выбор преобразователя частоты

Для управления двигателем выбираем преобразователь частоты типа ПЧВ фирмы ОВЕН. В отличие от зарубежных аналогичных преобразователей (Siemens,KEB, SchneiderElektric, OMPOH и др.) он отличается меньшей стоимостью при монтаже, наладке и эксплуатации, а также стоимостью

обучения обслуживающего персонала. Система управления обеспечивает как векторный, так и скалярный способы управления при высоких энергетических показателях электропривода во всем заявленном диапазоне регулирования скорости.

Преобразователи и комплектные электроприводы серии ЭПВ представляют собой новое поколение многофункциональных «интеллектуальных»устройств управления низковольтными (до 440 В)асинхронными и синхронными двигателями мощностью от 1 до 400 кВт, предназначенных для регулируемого привода механизмов и технологическихпроцессов с самыми различными требованиями кпараметрам регулирования и условиям эксплуатации: от насосов и вентиляторов до высокоточныхстанков и следящих систем.

Серия ЭПВ включает в себя следующие исполнения[11-13, 19]:

- бездатчиковый асинхронный электропривод мощностью 3..110 кВт, предназначенный для механизмов с диапазоном регулирования скорости до 50:1, непредъявляющих повышенных требований к быстродействию и точности регулирования скорости (насосы, вентиляторы, подъемно-транспортные средства и другиеобщепромышленные механизмы);

- преобразователи частоты мощностью 1..55 кВт с адаптивно-векторным управлением для высокоэффективных широкодиапазонных асинхронных исинхронных электроприводов, предназначенных длямеханизмов с повышенными требованиями к статическим и динамическим характеристикам (приводыглавного движения и подач металлорежущих станков с диапазоном регулирования скорости от 1 000 до 100 000 и полосой пропускания контура скоростидо 100 Гц и более);

- векторный асинхронный и синхронный электропривод без датчика скорости на валу двигателя,обеспечивающий высокие динамические характеристики в диапазоне регулирования 100:1, предназначенный для механизмов, предъявляющих повышенные требования к динамике, у которых вследствиетехнологических особенностей установка датчика навал двигателя не предусматривается (экструдеры,дробилки и другие механизмы химической

и горнорудной промышленности, тяговые электроприводытранспортных средств);

- рекуперативный выпрямитель мощностью 15..55 кВт с векторной системой управления, предназначенный для применения в преобразователях со звеном постоянного напряжения, реализующих функциюсвободного двунаправленного обмена энергией междупитающей сетью и нагрузкой с высокими энергетическими характеристиками и показателями электромагнитной совместимости. Характеризуется синусоидальным сетевым током и регулируемым коэффициентоммощности, который может устанавливаться равнымединице, а также «опережающим» или «отстающим». Область применения – электропривод механизмов,значительное время работающих в генераторных режимах (подъемно-транспортные механизмы, станки,работающие с часто повторяющимися циклами разгон /торможение, механизмы с большими моментами инерции).

Преобразователь частоты выбирается по номинальному току и напряжению. В соответствии с рекомендациями ОВЕН [11, 19] выбираем преобразователь ЭТТПТ-160-380-1АР-УХЛ4, типоразмер 125 с техническими данными:

- номинальная выходная мощность, кВА 82;
- типовая мощность двигателя, кВт 55;
- напряжение питания, В 380 +10/-15 %;
- частота напряжения питания, Гц 48..63;
- выходное напряжение, В 0…400;
- входное напряжение, В 380…400;
- выходная частота, Гц 0...400;
- частота модуляции, Гц 2 500… 10 000;
- номинальный выходной ток $I_{НОМ}$ (действ.), А 125;
- максимальный выходной ток I_{max} (действ.), А 200;
- ток срабатывания защиты $I_{МТЗ}$ (абс. зн.) А 200;
- максимальный ток торможения А 90 ;
- мин. сопротивление балласт. резистора Ом 6,8;

- мощность потерь в номинальном режиме, Вт 1 080;
- максимальная температура радиатора, °С+85;
- рабочий диапазон температур окружающей среды °С -10…+45.

2.3 Определение параметров силовой части системы ПЧ-АД

Определим параметры асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором типа 4А225М4У3IP44, приводящего в движение кабельный барабан с моментом статической нагрузки M_c= 150 Н•м и моментом инерции $J_{РМ}$= 1,45 кг•$м^2$ и составим структурную схему силовой части.

Таблица 2.1 – Технические данные двигателя 4А225М4У3

Наименование	Размерность	Значение
Номинальная мощность, $P_{ном}$	кВт	55
Номинальное напряжение сети, $U_{1л}$	В	380
Номинальная частота питающей сети, f_c	Гц	50
Синхронная частота вращения, n_0	об/мин	3 000
Номинальное скольжение, $S_{ном}$	%	1,8
Скольжение критическое, $S_{кр}$	%	10
Отношение $M_{пуск}/M_{ном}$	-	2,0
Отношение $M_{мин}/M_{ном}$	-	1,6
Отношение $M_{кр}/M_{ном}$	-	2,4
Отношение $I_{пуск}/I_{ном}$	-	6,0
Момент инерции, $J_{дв}$	кг*$м^2$	0,74
КПД, $\eta_{ном}$	%	87
Коэффициент мощности, $cos\varphi_{ном}$	-	0,79

Таблица 2.2 – Параметры схемы замещения

Сопротивление	x_μ	В номинальном режиме				При коротком замыкании		
		статора		ротора				
		R_1'	X_1'	R_2''	X_2''	R''_{2n}	$R_{кп}$	$X_{кп}$
В отн. единицах	2	0,028	0,1	0,026	0,14	0,048	0,076	0,14
В Омах	3,84	0,054	0,192	0,05	0,27	0,093	0,146	0,37

Номинальный фазный ток статора определяется по формуле:

$$I_{1\phi.ном} = \frac{P_{2ном}}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot \eta \cdot cos\varphi} = \frac{55 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0{,}82 \cdot 0{,}92} = 114{,}56 \ \ A,$$

(2.11)

Значение параметров схемы замещения в именованных единицах определяются по формулам:

$$x = X \cdot \frac{U_{1\phi}}{I_{1\phi.ном}} = X \cdot \frac{220}{114{,}56} = 1{,}92 \cdot X; \qquad (2.12)$$

$$r = R \cdot \frac{U_{1\phi}}{I_{1\phi.ном}} = R \cdot \frac{220}{114{,}56} = 1{,}92 \cdot R,$$

(2.13)

где x, r – сопротивление, Ом

X, R – сопротивление, отн. ед.

Результаты расчета сопротивлений в именованных единицах представлены в таблице 2.2.

Функциональная схема электропривода ПЧВ представлена на рисунке 4 и состоит из следующих основных элементов

Силовой канал осуществляет двухступенчатое преобразование электрической энергии – выпрямление сетевого напряжения с помощью нерегулируемого выпрямителя и последующее инвертирование выпрямленного постоянного по величине напряжения посредством автономного инвертора напряжения (АИН).

Алгоритм ШИМ обеспечивает взаимосвязанное регулирование частоты и величины выходного напряжения по заданному закону, а также формирует синусоидальную форму кривой тока приводного электродвигателя.

Для реализации режима динамического (реостатного) торможения в звено постоянного тока электропривода включён тормозной транзисторный ключ (IGBT) и внешний блок тормозного резистора.

Датчики тока и напряжения в силовом канале электропривода служат для контроля, регулирования и измерения электрических параметров

электропривода, в том числе, для защиты от токов перегрузки и короткого замыкания, недопустимых отклонений напряжения.

Многоканальный источник питания ИП преобразует сетевое переменное напряжение или выпрямленное напряжение звена постоянного тока в систему напряжений постоянного тока требуемых уровней и степени стабильности, гальванически связанных и не связанных между собой, для питания устройств управления.

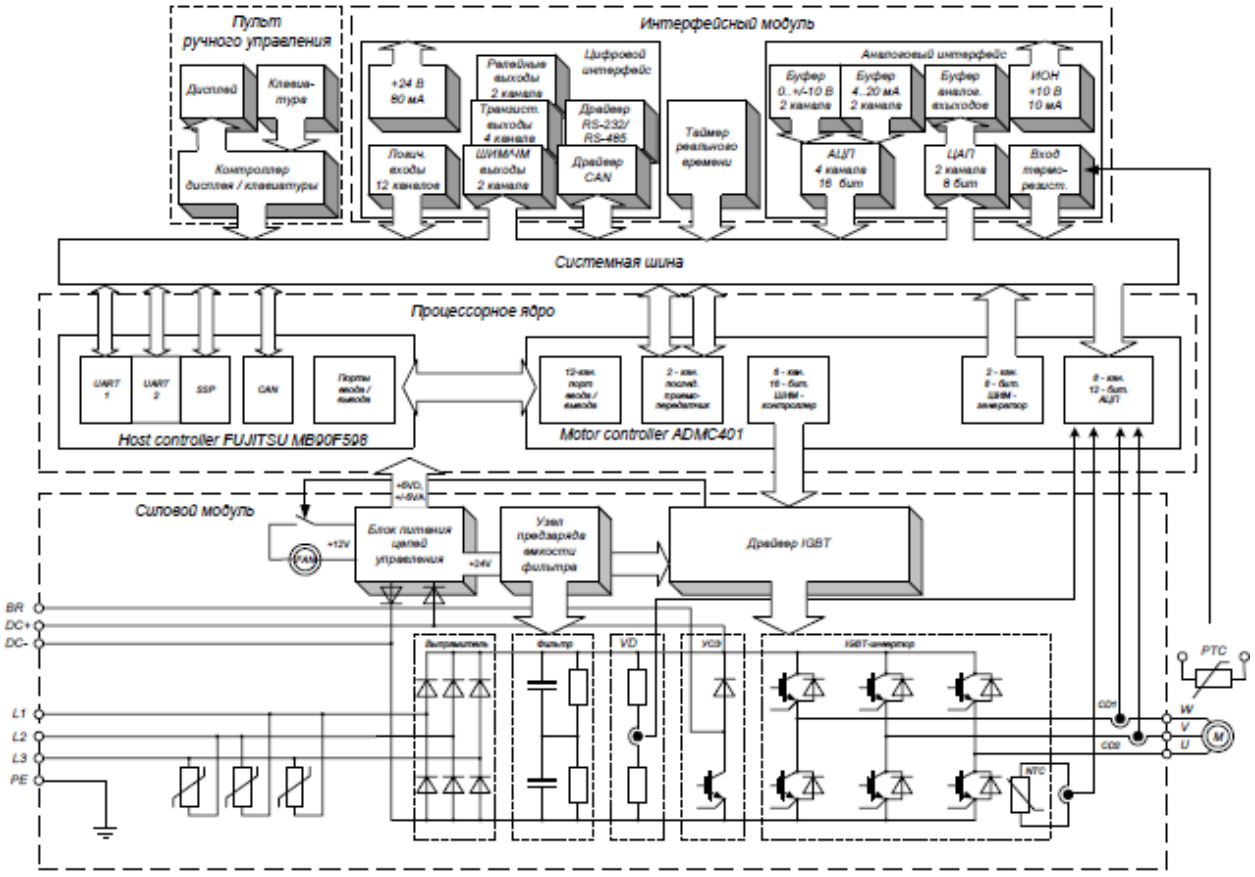


Рисунок 2.4 – Функциональная схема электропривода ПЧВ

Микропроцессорный контроллер осуществляет формирование режимов работы электропривода с заданными параметрами с помощью сигналов управления: сигналов ШИМ – управления транзисторами АИН, сигналов защиты и аварийного отключения электропривода, приема и передачи внешних управляющих, задающих и информационных сигналов.

2.3.1 Расчет и выбор элементов выходного фильтра

На выходе с автономного инвертора напряжения расположен фильтр. Наиболее распространенным видом выходного фильтра является LC – фильтр. Основным требованием, предъявляемым к фильтру, является обеспечение заданного коэффициента гармоник переменного напряжения в стационарном режиме.

Индуктивность фильтра определяется по формуле:

$$L_{ф2} \geq \frac{0{,}25 \cdot E_{макс}}{(0{,}4 \ldots 0{,}6) \cdot f_{к*} I_{1ном}},$$

(2.14)

где $E_{макс}$ - максимальное напряжение источника постоянного напряжения, В.

В данном случае это напряжение в звене постоянного тока с учетом возможного превышения напряжения сети на 10 %.

$$E_{макс} = 1{,}1 \cdot U_d = 566{,}5 \ ,$$

(2.15)

где $f_к$ – несущая частота, так называемая частота коммутации ШИМ.

В электроприводе типа ПЧВ несущая частота меняется программно. В данном случае $f_к = 8$ кГц. Предельная частота ограничена допустимой частотой переключения транзисторов, она составляет 10…20 кГц.

Численное значение индуктивности фильтра определиться:

$$L_{ф2} \geq \frac{0{,}25 \cdot 566{,}5}{0{,}6 \cdot 4000 \cdot 114{,}56} = 0{,}00051 \ \ Гн. \qquad (2.16)$$

К установке принимаем реактор типа РТСТ – 20,5-2,02У3, параметры которого приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Техническая характеристика реактора типа РТСТ – 20,5-2,02У3

Наименование	Размерность	Значение
Номинальное линейное напряжение питающей сети, $U_{сном}$	В	380
Номинальный фазовый ток, $I_{1ном}$	А	145
Номинальная индуктивность фазы, L_p	мГн	2,02
Активное сопротивление обмотки, R_p	мОм	26,5

Емкость фильтра определиться по формуле:

$$C_{ф2} = \frac{T_к^2}{64 \cdot k_г \cdot L_{ф2}},$$

(2.16)

где $T_к$ - период несущей частоты, с;

$$T_к = \frac{1}{f_к} = \frac{1}{4000} = 0{,}00025 \ \ c,$$

(2.17)

где $k_г$ - коэффициент высших гармоник; $k_г = 0{,}05$;

Численное значение емкости фильтра:

$$C_{ф2} = \frac{0{,}00025^2}{64 \cdot 0{,}05 \cdot 2{,}02 \cdot 10^{-3}} = 40 \ \ мкФ$$

К установке принимается конденсатор типа МБГВ с номинальной емкостью С=60 мкФ.

Дроссели включают в каждую фазу, последовательно с асинхронным двигателем, а конденсаторы соединяют в треугольник и включают параллельно двигателю. Соответственно конденсаторы существенно не влияют на общее сопротивление статорной цепи, поэтому сопротивлением фильтра при расчетах можно пренебречь.

2.3.2 Расчет и выбор элементов сглаживающего фильтра

Сглаживающие дроссели устанавливаются в звене постоянного тока низковольтных агрегатов и служат для снижения переменной составляющей тока через конденсаторы фильтра и уменьшения зоны прерывистых токов при работе электропривода. Конденсатор предназначен для замыкания реактивной составляющей тока статора.

Качество фильтра определяется коэффициентом сглаживания, который определяется:

$$S_{LC} = \frac{q_{вх}}{q_{вых}}, \qquad (2.18)$$

где $q_{вх}$ - коэффициент пульсации на входе фильтра;

$q_{вых}$ – коэффициент пульсации на выходе фильтра принимается в пределах 0,01…0,1; выберем $q_{вых} = 0{,}01$.

Коэффициент пульсации на входе фильтра определяется по формуле:

$$q_{вх} = \frac{2}{n^2 - 1}\sqrt{1 + n^2 * tg^2\alpha},$$

(2.19)

где n – число пульсаций выпрямителя; для трехфазной мостовой схемы n = 6;

α – угол управления вентилей выпрямителя; α = 0^0, так как напряжение регулируется в АИН, а тиристорный преобразователь неуправляемый.

$$q_{вх} = \frac{2}{6^2 - 1}\sqrt{1 + 6^2 \cdot tg^2 0} = 0{,}057.$$

Численное значение коэффициента сглаживания:

$$S_{LC} = \frac{0{,}057}{0{,}01} = 5{,}7$$

Емкость фильтра принимается из расчета 100 мкФ на 1 кВт мощности двигателя.

Расчетная мощность фильтра определится: *мкФ*

$$C_{ф1} = 100 \cdot P_{двном}; \quad C_{ф1} = 100 \cdot 55 = 5500 \ .$$

К установке выбирается конденсатор типа МБГО – 1 – 400 В – 500 мкФ ±10%.

Индуктивность фильтра определяется по формуле, *Гн*

$$L_{ф1} = \frac{5{,}7 + 1}{6^2 \cdot 314^2 \cdot 390 \cdot 10^{-6}} = 4{,}84 \cdot 10^{-3}.$$

К установке принимает реактор типа ФРОС – 250/0,5УЗ, параметры которого представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Параметры реактора типа ФРОС – 250/0,5УЗ

Наименование	Размерность	Значение
Номинальный постоянный ток, $I_{1ном}$	А	320
Номинальная индуктивность фазы, L_p	мГн	4,2
Активное сопротивление обмотки, R_p	Ом	11,5

2.3.3 Разработка структурной схемы силовой части

Силовая часть электропривода состоит из преобразователя частоты и электродвигателя. Структурная схема силовой части представлена на рисунке 2.

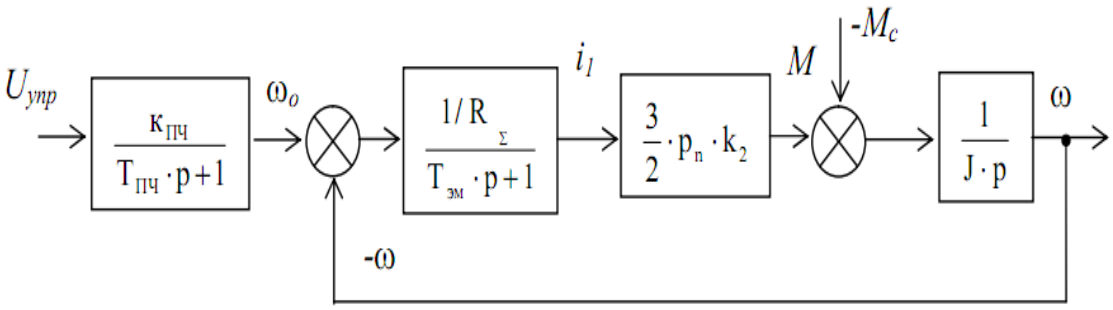


Рисунок 2.5 – Структурная схема силовой части электропривода

Динамические свойства преобразователя частоты совместно с блоками измерения и преобразования координат могут быть упрощенно учтены апериодическим звеном с передаточной функцией [1-3, 13].

$$W(p)_{ТП}=\frac{K_{ПЧ}}{T_{пч}\cdot p+1},$$

(2.20)

где $T_{ПЧ}$ - эквивалентная постоянная времени преобразователя, с;

$K_{ПЧ}$ – эквивалентный передаточный коэффициент преобразователя

$$K_{ПЧ}=\frac{U_{dмакс}}{U_{упр.макс}},$$

(2.21)

где $U_{d\,макс}$ - номинальное фазное напряжение на выходе преобразователя, В;

$U_{упр.макс}=10\ \ B$ - максимальное напряжение системы управления.

Численное значение коэффициента передачи преобразователя частоты равно:

$$K_{ПЧ}=\frac{220}{10}=22.$$

Постоянная времени $T_{ПЧ}$ складывается из времени задержки включения ШИМ $T_к$ и времени, затрачиваемого процессором на преобразование и вычисление сигналов ($T_{пр}=1\ мс$).

Время задержки ШИМ определится как [7]:

$$T_к=\frac{1}{f_к}=\frac{1}{8000}=0{,}000125\approx 0{,}0001\ \ c.$$

Численное значение постоянной времени преобразователя:

$$T_{ПЧ}=T_{пр}+T_к=0{,}001+0{,}0001\approx 0{,}0011\ \ c.$$

Электродвигатель представляется передаточными функциями электромагнитной и механической частей, представленных апериодическим и интегрирующим звеньями, соединенными последовательно.

Электромагнитная часть представляет из себя передаточную функцию от напряжения статора к току статора [13]:

$$W(p)_{эм}=\frac{1/R_\Sigma}{T_{эм}\cdot p+1},$$

(2.22)

где R_Σ - суммарное сопротивление двигателя определяется по формуле:

$$R_\Sigma=R_{ф2}+R_1+k_2^2*R_2^{'},$$

(2.23)

где $R_{ф2}$ - активное сопротивление выходного фильтра на выходе АИН, Ом;

R_1 – активное сопротивление обмотки статора, Ом;

R_2' - приведенное активное сопротивление обмотки ротора, Ом;

k_2 - коэффициент электромагнитной связи ротора.

Взаимная индуктивность асинхронного двигателя определиться по формуле, Гн:

$$L_\mu=\frac{x_\mu}{2\cdot\pi\cdot f_{1ном}};\qquad L_\mu=\frac{59{,}28}{2\cdot 3{,}14\cdot 50}=0{,}188\ \ Гн.$$

Индуктивность рассеяния статора, Гн:

$$L_{1\sigma}=\frac{x_1}{2\cdot\pi\cdot f_{1ном}};\qquad L_{1\sigma}=\frac{1{,}95}{2\cdot 3{,}14\cdot 50}=0{,}062\ \ Гн.$$

Полная индуктивность фазы статора, Гн:

$$L_1 = L_\mu + L_{1\sigma} = 0{,}188 + 0{,}0062 = 0{,}1942.$$

Индуктивность рассеяния ротора Гн:

$$L_{2\sigma}^{'} = \frac{x_2{}'}{2 \cdot \pi \cdot f_{1ном}}; \qquad L_{2\sigma}^{'} = \frac{3{,}46}{2 * 3{,}14 * 50} = 0{,}011 \ \ Гн.$$

Полная индуктивность фазы ротора Гн:

$$L_2 = L_\mu + L_{2\sigma}^{'} = 0{,}188 + 0{,}0011 = 0{,}1891 \ \ Гн.$$

Индуктивность рассеяния асинхронного двигателя Гн:

$$L_\sum = L_2^{'} - \frac{L_\mu^2}{L_1}; \qquad L_\sum = 0{,}1891 - \frac{0{,}188^2}{0{,}1942} = 0{,}0071 \ \ Гн$$

или по приближенной формуле:

$$L_\sum \approx L_{1\sigma} + L_{2\sigma}^{'} \approx 0{,}062 + 0{,}0011 \approx 0{,}063 \ \ Гн.$$

В дальнейших расчетах принимаем $L_\sum = 0{,}0063 \ \ Гн$.

Коэффициент электромагнитной связи ротора определяется по формуле [13]:

$$k_2 = \frac{L_\mu}{L_2{}'}; \qquad k_2 = \frac{0{,}188}{0{,}1891} = 0{,}994.$$

Численное значение суммарного сопротивления двигателя будет равна, Ом

$$R_\sum = 0{,}265 + 1{,}64 + 0{,}994^2 \cdot 1{,}31 = 3{,}199 \ \ Ом.$$

Электромагнитная постоянная времени асинхронного двигателя определиться по формуле, с

$$T_{эм} = \frac{L_\sum}{R_\sum} = \frac{0{,}033}{3{,}2} = 0{,}01 \ \ с.$$

Электромагнитный момент двигателя формируется на основании уравнения [1-3, 13], кгм

$$M(p) = \frac{3}{2} \cdot p_n \cdot k_2 \cdot i_1(p); \qquad M(p) = \frac{3}{2} \cdot 2 \cdot 0{,}994 \cdot i_1(p) = 2{,}982 \cdot i_1(p),$$

где p_n- число пар полюсов обмотки статора, $p_n = 2$.

Механическая часть асинхронного двигателя представляется интегрирующим звеном с передаточной функцией:

$$. W(p)_{мех} = \frac{1}{J \cdot p}; \qquad W(p)_{мех} = \frac{1}{1{,}45 \cdot p}$$

Структурная схема силовой части системы ПЧ – АД смоделирована в программе Simulink. Вид модели представлен на рисунках 2.5 и 2.6.

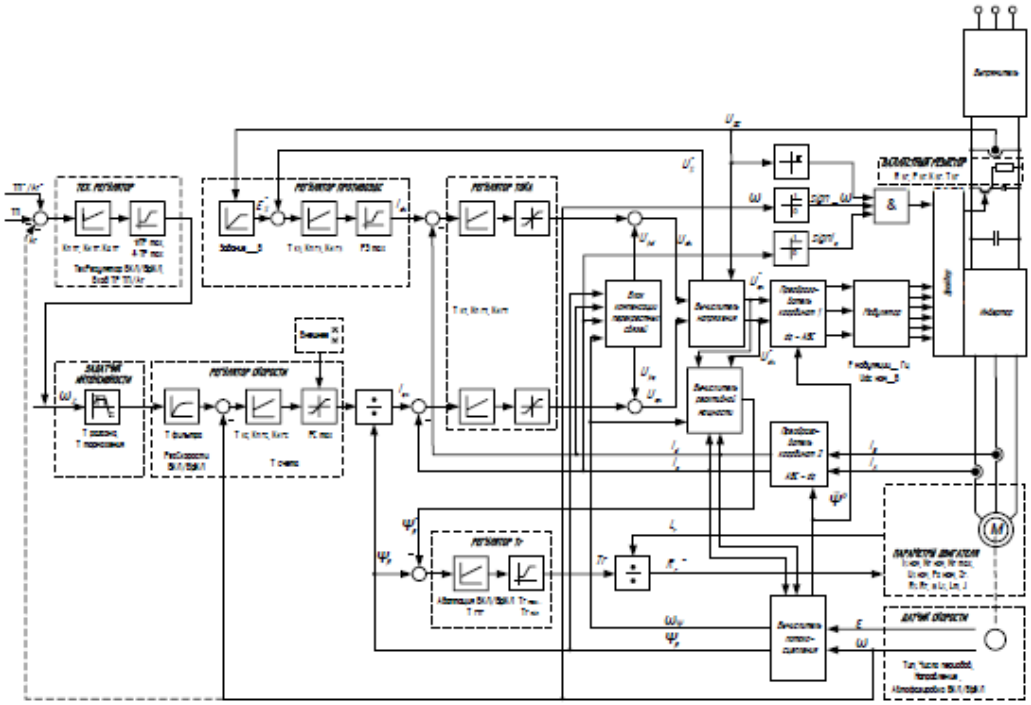


Рисунок 2.5 - Структурная схема системы управления приводом лебедки

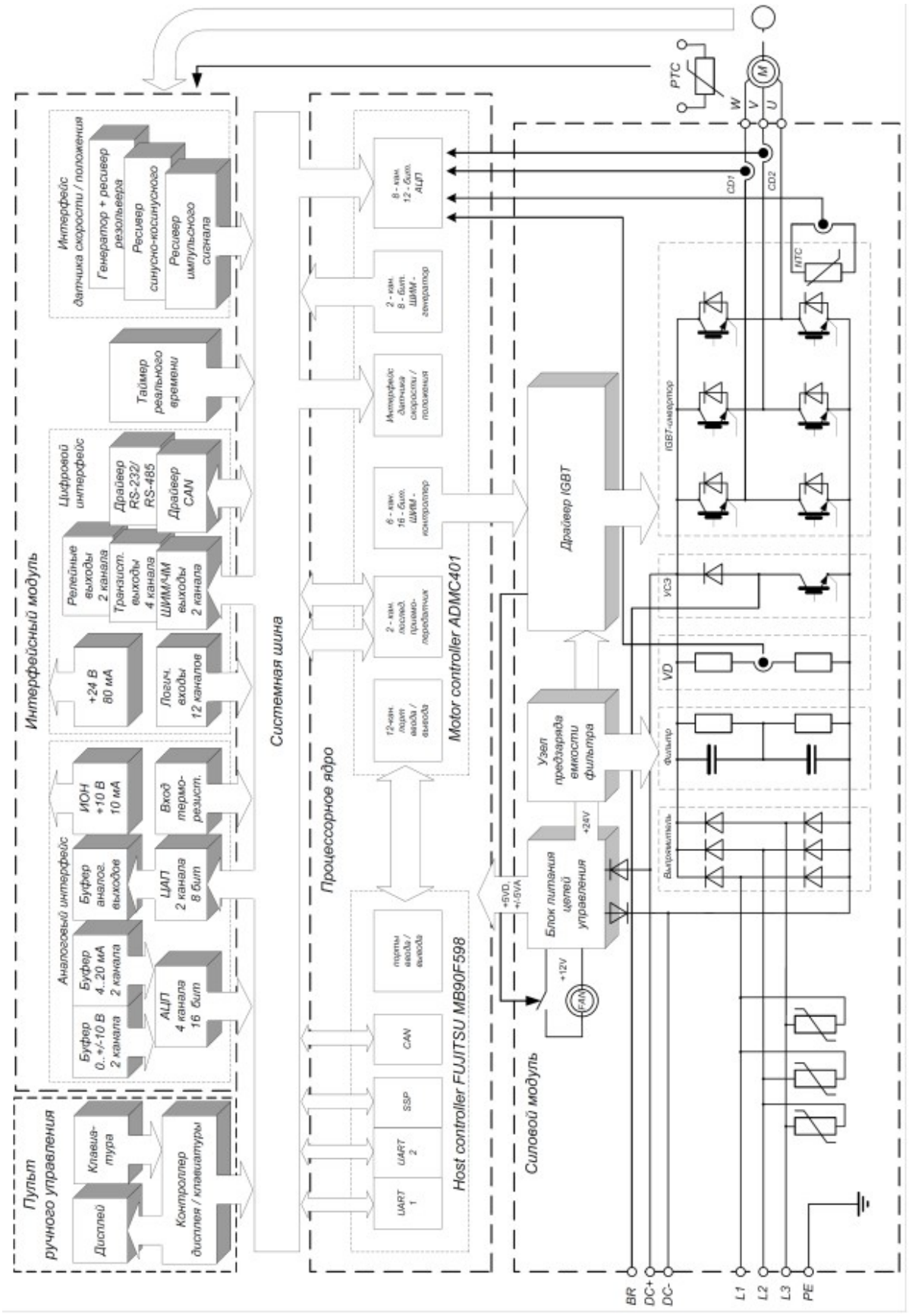


Рисунок 2.6 - Структурная схема силовой части системы ПЧ – АД смоделированая в программе Simulink

2.4 Определение структуры, типа и параметров регуляторов

электропривода

Сведения о системах подчиненного управления электроприводами.

На современных отечественных буровых установках с индивидуальным электроприводом основных механизмов широкое распространение получили системы подчиненного управления, которые включают последовательное (каскадное) соединение контуров управления. При этом число каскадов управления равно числу управляемых величин (координат) электропривода, каждая из которых имеет собственный регулятор [2-4, 15].

В системах подчиненного управления электроприводом выходной сигнал каждого предыдущего регулятора является задающим сигналом для последующего регулятора. Системы подчиненного управления электроприводами по сравнению с системами, имеющими общий суммирующий усилитель, на входе которого суммируются задающий сигнал и сигналы обратных связей по скорости, напряжению, току и т. д., обладают рядом преимуществ.

Отметим некоторые из них:

- возможность построения самых разнообразных схем управления по агрегатному принципу, т. е. на основе небольшого числа стандартных элементов (ячеек, блоков и т. д.);

- простота осуществления связи электропривода с бесконтактными логическими и вычислительными устройствами для управления сложными технологическими процессами;

- малая мощность управления;

- применение комплектных высоконадежных элементов, выпускаемых на основе современных технологий;

- возможность реализации оптимальных законов управления каждой управляемой величины по отдельности и электроприводом в целом;

- простота схем, обеспечивающих ограничения управляемых величин (тока, скорости и др.) на заданном уровне;

- значительное снижение стоимости и сокращение сроков проектирования, монтажа и ввода в эксплуатацию электрооборудования и др.

В системах подчиненного управления задача регулирования координат электропривода возлагается на систему управления, использующую средства вычислительной техники и последние достижения электроники.

Возможность сопряжения отдельных модулей в системе обеспечивается тем, что информация передается унифицированными сигналами, ограниченными по уровню напряжением ±10 В. С целью уменьшения числа разъемов и повышения надежности систем управления в настоящее время применяются микропроцессорные устройства, реализующие сложные функции управленияэлектроприводом. Например, такоеустройствообычно содержит регулятор тока, регулятор скорости с узлом ограничения, узел выделения сигнала ЭДС двигателя, задатчик интенсивности разгона двигателя, систему управления силовым преобразователем и др.

Важной особенностью систем подчиненного управления электроприводами является возможность простыми средствами обеспечить оптимальное протекание процессов в контурах регулирования. Наибольшее распространение на практике получила настройка параметров регуляторов по техническому или симметричному оптимумам.

2.5 Синтез и анализ системы векторного управления скоростью с ориентацией по потокосцеплению ротора

Структурная схема САР при векторном управлении.

На основании функциональной схемы приведенной на рисунке 2.7 выполним разработку структурной схемы регулирования скорости, которая представлена на рисунке 2.8 [13-17] и определим передаточные функции регуляторов в общем виде.

В состав структурной схемой системы регулирования входят следующие основные звенья с передаточными функциями:

- $W_{рп}$ – регулятор потока;

- $W_{рт}$ – регулятор тока;

- $W_{рс}$ – регулятор скорости.

$\frac{k_П}{T_П p+1}$ – передаточная функция преобразователя частоты;

$\frac{\frac{1}{R_{1Э}}}{T_{1Э} p+1}$ - передаточная функция двигателя, характеризующая статор;

$\frac{k_2 \cdot L_2}{T_2 p+1}$ - передаточная функция двигателя, характеризующая ротор;

$\frac{1}{Jp}$ - передаточная функция двигателя, характеризующая нагрузку на валу двигателя;

- $K_{оп}$ – коэффициент обратной связи по потоку;

- $K_{от}$ – коэффициент обратной связи по току;

-$K_{ос}$ – коэффициент обратной связи по скорости.

Синтез регулятора тока.

На рисунке 2.7 представлена структурная схема контура тока с фильтром на входе [4, 13].

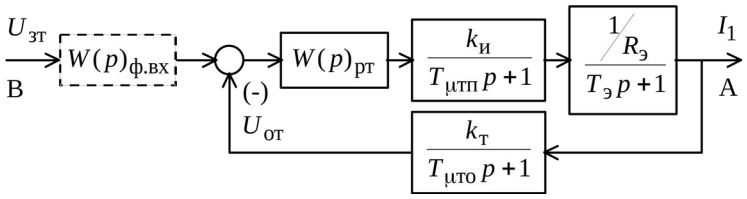


Рисунок 2.7 - Структурная схема контура тока

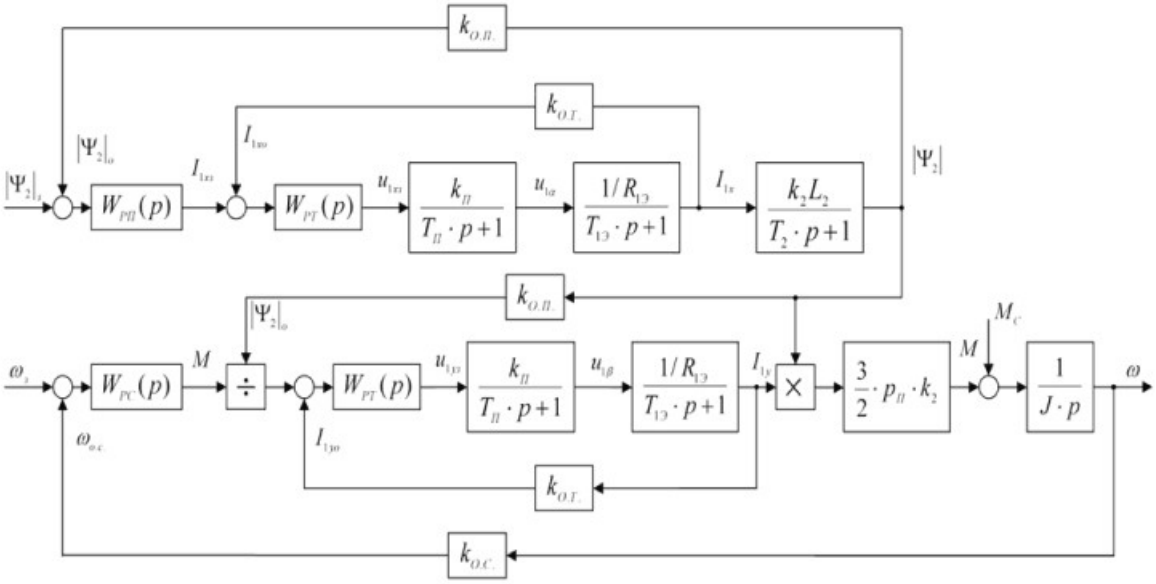


Рисунок 2.8 - Структурная схема ПЧ-АД при векторной системе управленияскоростью

Запишем передаточную функцию разомкнутого контура стабилизации тока:

$$W_{раз.к.стаб.I}(p)=W_{РТ}(p)\cdot\frac{k_П}{T_П\cdot p+1}\cdot\frac{1/R_{1Э}}{T_{1Э}\cdot p+1}, \quad (2.24)$$

где $R_{1Э}$ - суммарное активное сопротивление фазы двигателя.

$$R_{1Э}=R_s+k_r^2\cdot R_r \quad (2.25)$$

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура стабилизации тока:

$$W_{ж.раз.к.стаб.I}(p)=\frac{1/k_{О.Т.}}{a_T\cdot T_\mu\cdot p\cdot(T_\mu\cdot p+1)}, \quad (2.26)$$

Принимаем $a_T=2$ в соответствии с настройкой регулятора на модульный оптимум (МО), некомпенсируемая постоянная времени $T_\mu=T_П$.

Вычислим:

$$W_{РТ}(p)=\frac{1/k_{О.Т.}}{2\cdot T_{П}\cdot p\cdot(T_{П}\cdot p+1)}\cdot\frac{T_{П}\cdot p+1}{k_{П}}\cdot\frac{T_{1Э}\cdot p+1}{1/R_{1Э}}=\frac{T_{1Э}\cdot p+1}{k_{О.Т.}\cdot 2\cdot T_{П}\cdot p\cdot k_{П}\cdot 1/R_{1Э}}$$

Обозначим:

$$T_{ИП}=\frac{k_{О.Т.}\cdot 2\cdot T_{П}\cdot k_{П}}{R_{1Э}}$$

Тогда передаточная функция регулятора тока примет вид:

$$W_{РТ}(p)=\frac{T_{1Э}\cdot p+1}{T_{ИП}\cdot p}$$

Синтез регулятора потока.

Структурная схема контура потокосцепления с фильтром на входе представлена на рисунке 2.9.

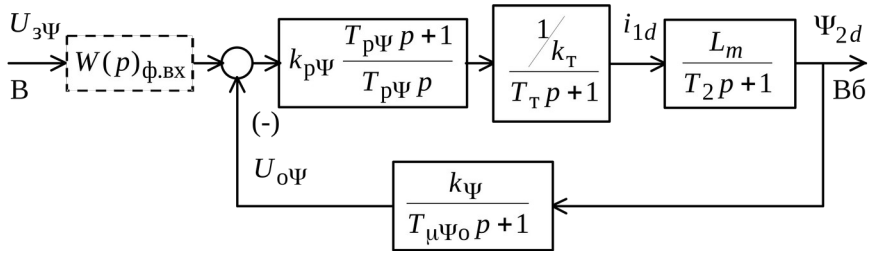


Рисунок 2.9 - Структурная схема контура потокосцепления

Запишем передаточную функцию разомкнутого контура стабилизации потока в следующем виде:

$$W_{раз.к.стаб.П}(p)=W_{РП}(p)\cdot W_{зам.к.стаб.I}(p)\cdot\frac{k_r\cdot L_r}{T_2\cdot p+1}$$

. (2.26)

Передаточная функция замкнутого контура регулирования потока равна:

$$W_{зам.к.стаб.I}(p)=\frac{W_{раз.к.стаб.I}(p)}{1+W_{раз.к.стаб.I}(p)\cdot k_{О.Т.}}=\frac{1/k_{О.Т.}}{2\cdot T_{П}\cdot p+1}$$

(2.27)

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура стабилизации потока имеет вид:

$$W_{ж.раз.к.стаб.П}(p)=\frac{1/k_{О.П.}}{a_T\cdot T_{\mu c}\cdot p\cdot(T_{\mu c}\cdot p+1)} \tag{2.28}$$

Принимаем $a_T=2, a_П=2$ в соответствии с настройкой регулятора на МО, а нескомпенсированную постоянную времени принимаем равной $T_{\mu c}=a_П\cdot T_П$.

Вычислим передаточную функцию регулятора:

$$W_{РП}(p)=\frac{1/k_{О.П.}}{2\cdot 2\cdot T_П\cdot p\cdot(2\cdot T_П\cdot p+1)}\cdot\frac{2\cdot T_П\cdot p+1}{1/k_{О.Т.}}\cdot\frac{T_2\cdot p+1}{k_r\cdot L_r}=\frac{k_{О.Т.}\cdot(T_2\cdot p+1)}{4\cdot T_П\cdot p\cdot k_{О.П.}\cdot L_m}$$

Обозначим:

$$T_{ИП}=\frac{k_{О.П.}\cdot 4\cdot T_П\cdot L_{12}}{k_{О.Т.}}$$

Тогда передаточная функция регулятора потока примет вид:

$$W_{РП}(p)=\frac{T_2\cdot p+1}{T_{ИП}\cdot p} \tag{2.29}$$

Синтез регулятора скорости.

Структурная схема контура скорости с фильтром на входе представлена на рисунке 2.10.

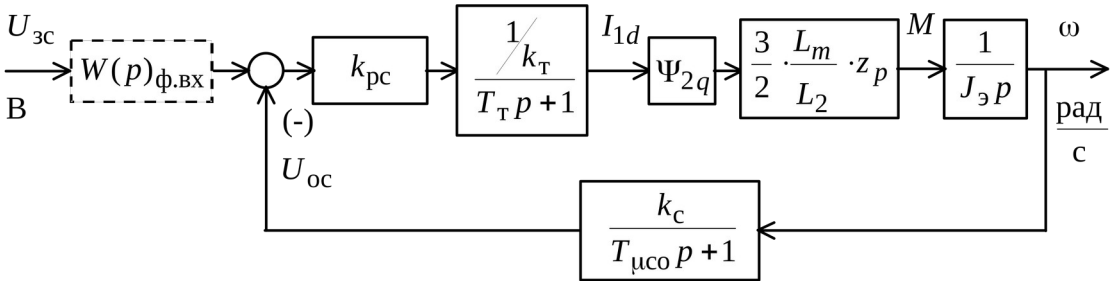


Рисунок 2.10 - Структурная схема контура скорости

Запишем передаточную функцию разомкнутого контура скорости в виде:

$$W_{раз.к.стаб.С}(p)=\frac{1}{|\Psi_2|\cdot k_{О.П.}}\cdot W_{РС}(p)\cdot W_{зам.к.стаб.I}(p)\cdot|\Psi_2|\cdot\frac{3}{2}\cdot p_П\cdot k_r\cdot\frac{1}{J\cdot p}$$

Передаточная функция замкнутого контура регулирования скорости будет равна:

$$W_{зам.к.стаб.I}(p)=\frac{W_{раз.к.стаб.I}(p)}{1+W_{раз.к.стаб.I}(p)\cdot k_{О.Т.}}=\frac{1/k_{О.Т.}}{2\cdot T_П\cdot p+1}$$

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура стабилизации скорости примет вид:

$$W_{ж.раз.к.стаб.С}(p)=\frac{1/k_{О.С.}}{a_T\cdot T_{\mu с}\cdot p\cdot(T_{\mu с}\cdot p+1)}$$

.

Принимаем $a_T=2, a_C=2$ в соответствии с настройкой регулятора на МО, а не скомпенсированную постоянную времени $T_{\mu с}=a_C\cdot T_П$.

Тогда передаточная функция регулятора скорости будет равна

$$W_{РС}(p)=\frac{1/k_{О.С.}}{2\cdot 2\cdot T_П\cdot p\cdot(2\cdot T_П\cdot p+1)}\cdot\frac{2\cdot T_П\cdot p+1}{1/k_{О.Т.}}\cdot\frac{2\cdot k_{О.П.}\cdot J\cdot p}{3\cdot p_П\cdot k_r}=$$

$$=\frac{k_{О.П.}\cdot k_{О.Т.}\cdot J}{3\cdot p_П\cdot k_r\cdot 2\cdot T_П\cdot k_{О.С.}}=k_{РС}$$

.

Расчет числовых значений параметров регуляторов.

Коэффициент обратной связи по потоку при ψR = 0,68 Вб [3, 11], В/Вб:

$$k_{О.П.}=\frac{10}{\Psi_R};$$ (2.30)

$$k_{О.П.}=\frac{10}{0,68}=14,71;$$

Коэффициент обратной связи по току, В/А:

$$k_{О.Т.}=\frac{10}{I_{1уб}}$$

,

$$k_{О.Т.}=\frac{10}{2\cdot 145,2}=0,03$$

.

Коэффициент обратной связи по скорости, В*с/рад:

$$k_{О.С.}=\frac{10}{\omega_н}$$

$$k_{О.С.}=\frac{10}{314}=0,03$$

.

Коэффициент передачи преобразователя по напряжению и постоянная времени:

$$k_{П}=\frac{U_m}{10};$$

$$k_{П}=\frac{220}{10}=22$$

.

ТП, = 0,001 с.

Постоянная времени контура тока, с:

$$T_{ИИ}=\frac{k_{О.Т.}\cdot 2\cdot T_{П}\cdot k_{П}}{R_{1Э}};$$

$$T_{ИИ}=\frac{0,03\cdot 2\cdot 0,001\cdot 22}{3,199}=0,0004.$$

Суммарное активное сопротивление фазы двигателя, Ом:

$$R_{1Э}=R_{\Sigma}=0,265+1,64+0,994^{2}\cdot 1,31=3,199 \ \ Ом.$$

Передаточная функция регулятора тока:

$$W_{РТ}(p)=\frac{T_{2}\cdot p+1}{T_{ИИ}\cdot p}, \qquad (2.31)$$

$$W_{РТ}(p)=\frac{0,0525\cdot p+1}{0,0185\cdot p}$$

Малая электромагнитная постоянная времени двигателя, с:

$$T_{2}=\sigma\cdot\frac{L_{s}}{R_{1Э}}; \qquad (2.32)$$

$$T_{2}=0,018\cdot\frac{0,0882}{3,1}=0,0005.$$

Постоянная времени контура потока, с:

$$T_{ИП}=\frac{k_{О.П.}\cdot 4\cdot T_{П}\cdot L_{m}}{k_{О.Т.}}; \qquad (2.33)$$

$$T_{ИП}=\frac{14,71\cdot 4\cdot 0,001\cdot 0,0875}{0,03}=0,15.$$

Передаточная функция регулятора потока:

$$W_{РП}(p)=\frac{T_{2}\cdot p+1}{T_{ИП}\cdot p}; \qquad (2.34)$$

$$W_{РП}(p)=\frac{0,0005\cdot p+1}{0,15\cdot p}.$$

Постоянная времени роторной цепи, с:

$$T_2 = \frac{L_r}{R_r}; \qquad (2.35)$$

$$T_2 = \frac{0,0884}{0,0094} = 9,4.$$

Коэффициент передачи регулятора скорости:

$$k_{PC} = \frac{k_{O.П.} \cdot k_{O.Т.} \cdot J_{\sum}}{3 \cdot p_П \cdot k_r \cdot 2 \cdot T_П \cdot k_{O.С.}}, \qquad (2.36)$$

$$k_{PC} = \frac{14,71 \cdot 0,03 \cdot 1,45}{3 \cdot 2 \cdot 0,973 \cdot 2 \cdot 0,001 \cdot 0,03} = 1460.$$

2.6 Исследование электропривода на модели

Моделирование выполним с помощью программы структурногомоделирования PSM32, разработанной на кафедре ЭПАПУ. Схема модели электропривода лифта с задатчиком интенсивности представлена на рис. и соответствует структурной схеме частотного электропривода с векторным управлением [5, 6, 10].

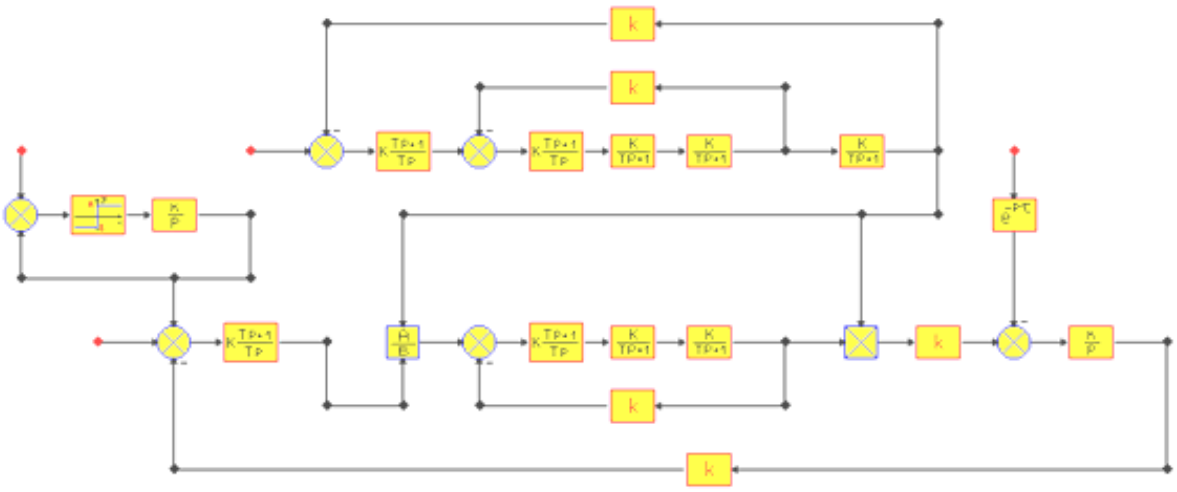


Рисунок 2.11 - Схема модели электропривода лебедки

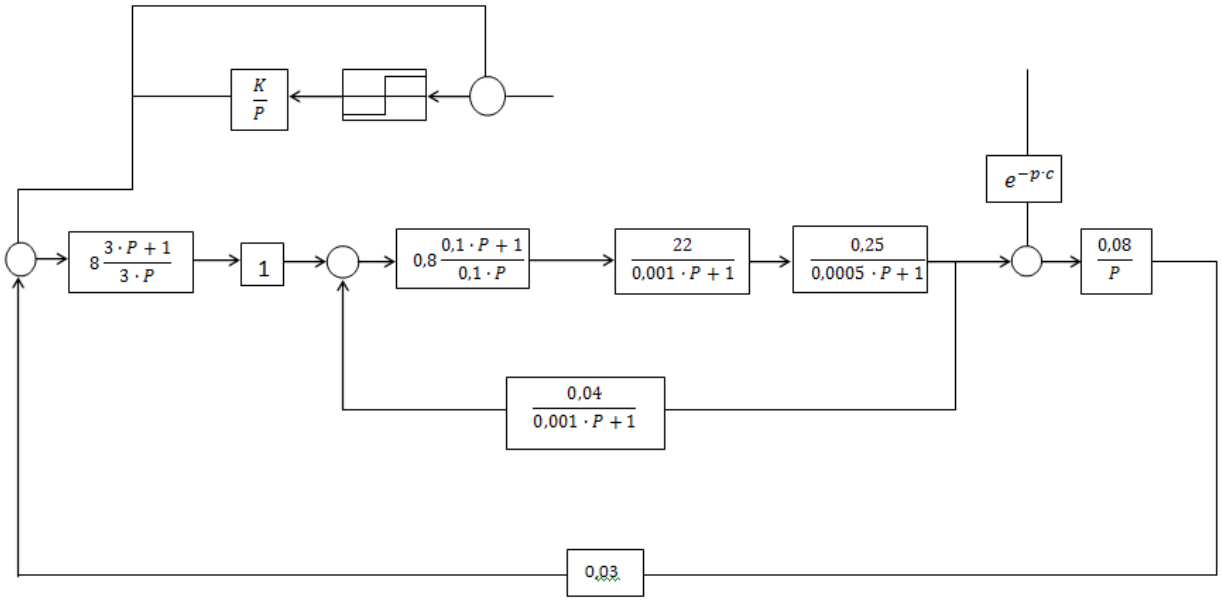


Рисунок 2.12 - Схема модели электропривода лебедки
с цифровыми значениями

При разработке модели для АД и ПЧ приняты следующие допущения [15, 18]:

- не учитываются потери в стали;
- рассматривается трехфазный симметричный режим работы;
- не учитывается насыщение магнитной цепи АД;
- напряжения на выходе ПЧ принимаются синусоидальной формы;
- максимальные уровни входных сигналов управления и выходных напряжений управления (регуляторов) принимаются на уровне ±10 В;
- расчет параметров модели проведен по паспортным данным двигателя и ПЧ;
- моделирование выполнено в среде PSM32.

Так как САР регулирования скорости является существенно нелинейной (из-за ограничения токов, моментов, нелинейных элементов), то уточненные параметры регуляторов будем определять путем моделирования САР.

При расчете регуляторов сделано достаточно много допущений, поэтому регуляторы требуют наладки на объекте, а в дипломном

проектировании – на модели объекта. Моделирование замкнутой САР позволяет оценить качество реакции системы на ступенчатые и другие воздействия как по управлению, так и по нагрузке. Если результат расчета регуляторов не дал качественных процессов, следует уточнить параметры регуляторов или настроить систему заново.

Наладка систем в соответствии с методом Зиглера-Никольса [19,16] производится следующим образом. Вначале в контур включают пропорциональный регулятор и, постепенно повышая его коэффициент усиления, наблюдают за характером переходного процесса, подавая на систему небольшие ступенчатые входные воздействия и не допуская ограничения регулятора. По мере увеличения усиления замкнутого контура время переходного процесса в нем сокращается, но возрастает перерегулирование. Как только процесс станет колебательным, следует прекратить увеличение усиления регулятора и даже слегка уменьшить его.

После этого в регулятор включается большая интегральная составляющая. Постепенно уменьшая постоянную времени интегрирования, вновь наблюдают за характером переходного процесса при небольших ступенчатых входных воздействиях. По мере снижения времени интегрирования возрастает перерегулирование, и как только оно достигнет допустимой величины, следует прекратить уменьшение постоянной интегрирования.

Затем включаются средства ограничения регулятора, и входные сигналы увеличивают по величине, проверяя реакцию системы с учетом присущих ей нелинейностей. На этом процесс настройки контура завершают и переходят к настройке следующего контура.

Ниже приведены графики переходных процессов тока и скорости лебедки (электродвигателя) при типовых режимах работы. На рисунках 2.13, 2.14 и 2.15 представлены графики переходных процессов для варианта привода с векторным управлением без датчика скорости. Вычисление в таком приводе сигнала, пропорционального скорости, по косвенным параметрам (частоте, току, напряжению статора) выполняется с некоторой задержкой времени, что

приводит к замедленной реакции привода, особенно при работе в нижней части диапазона регулирования скорости.

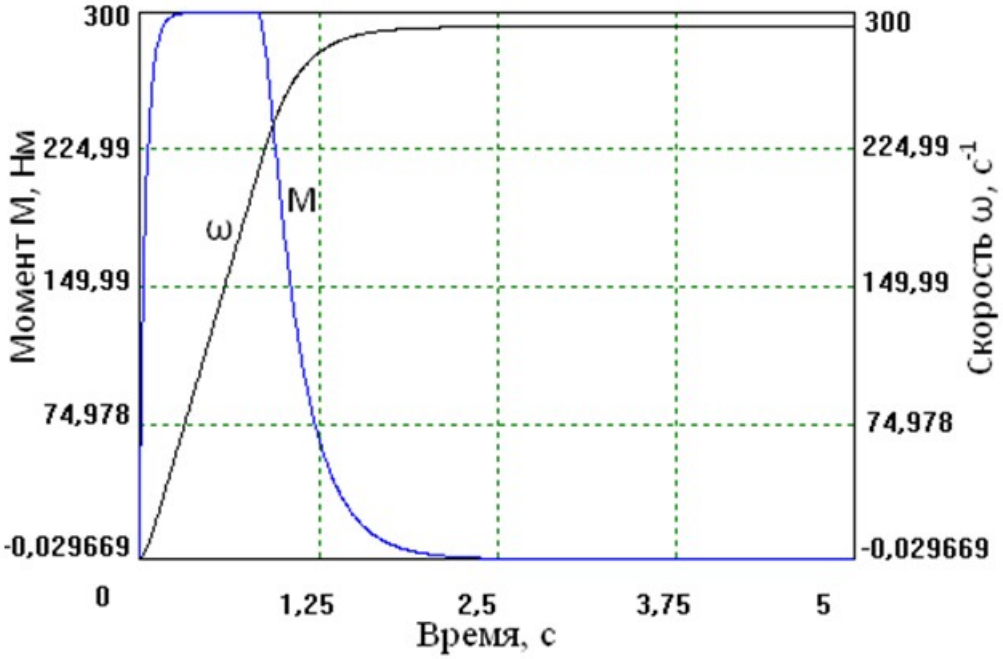


Рисунок 2.13 - График скорости и момента при ступенчатом задании скорости и ограничении момента до $M = 2M_н$

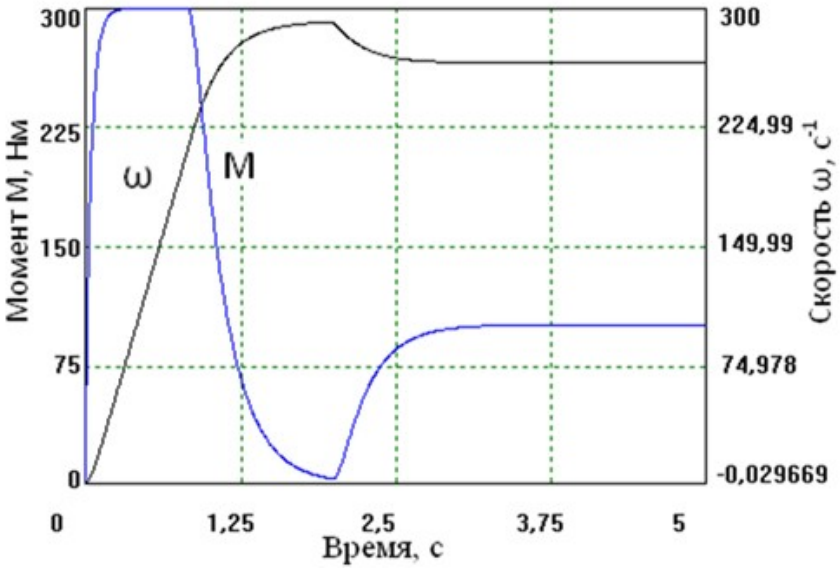


Рисунок 2.14 - График скорости и момента на при ступенчатом задании скорости и ограничении момента до $M = 2M_н$, нагрузка M = 100 Нм в момент времени 2 с

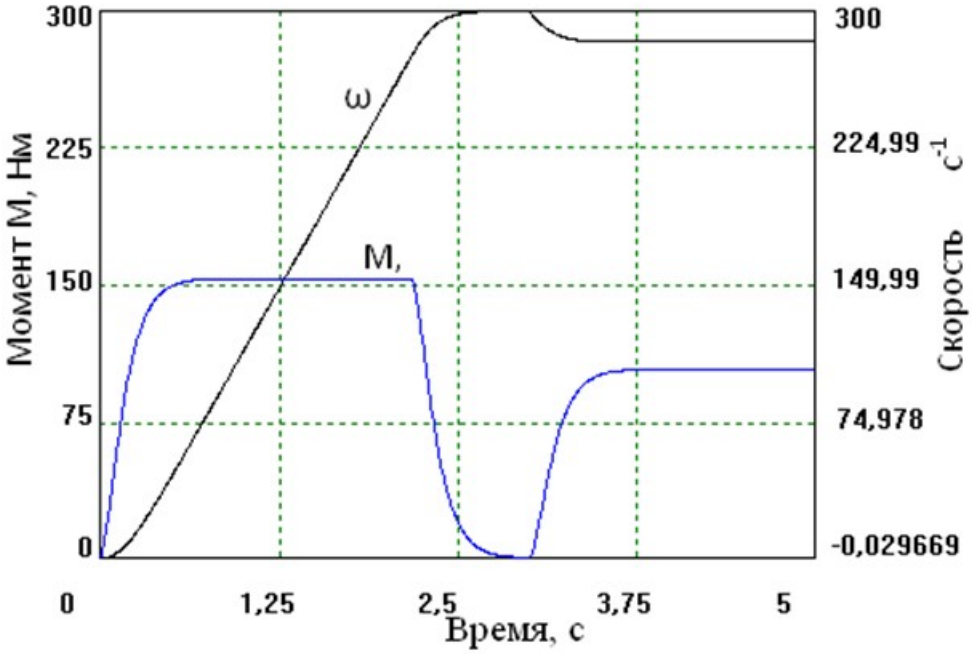


Рисунок 2.15 - Графики скорости и момента на Х.Х при ступенчатом задании скорости и нагрузки при ограничении момента до $M = 2M_H$ с задатчиком интенсивности

Результаты моделирования позволяют сделать вывод, что при выбранных элементах, структуре и параметрах регуляторов система регулирования скорости лифта обеспечивает удовлетворительные показатели:

Время переходного процесса составляет не более 0,5 с. без перерегулирования, наброс нагрузки не вызывает значительного падения скорости, ускорение при разгоне/торможении не превышает предельного значения м\с^2. Увеличение нагрузки приводит к незначительному увеличению (не более 0,5 с.) времени переходного процесса.

При векторном управлении без датчика скорости сигнал, пропорциональный скорости (точнее – ЭДС двигателя) формируется с задержкой, вследствие чего привод оказывается разомкнутым по скорости.

Такая задержка в формировании сигнала управления делает систему существенно нелинейной, снижает устойчивость и качество регулирования скорости.

Выводы. Результаты моделирования позволяют сделать вывод, что при выбранных элементах, структуре и параметрах регуляторов разработанная

система регулирования скорости лебедки обеспечивает удовлетворительные показатели: время переходного процесса составляет не более 0,5 с. без перерегулирования, наброс нагрузки не вызывает значительного падения скорости, ускорение при разгоне/торможении не превышает предельного значения 0,2 м\с^2 и может регулироваться в широких пределах средствами преобразователя частоты.

Увеличение нагрузки приводит к незначительному увеличению (не более 0,5 с.) времени переходного процесса.

Ограничение тока/момента двигателя лебедки осуществляется на заданном уровне.

2.7 Разработка схемы электрической подключения

На рисунке 2.16 показана схема подключения электропривода с использованием минимального набора сигналов управления и заводской настройкой входов и выходов. Различные варианты использования входных и выходных цепей преобразователя частоты рассмотрены ниже.

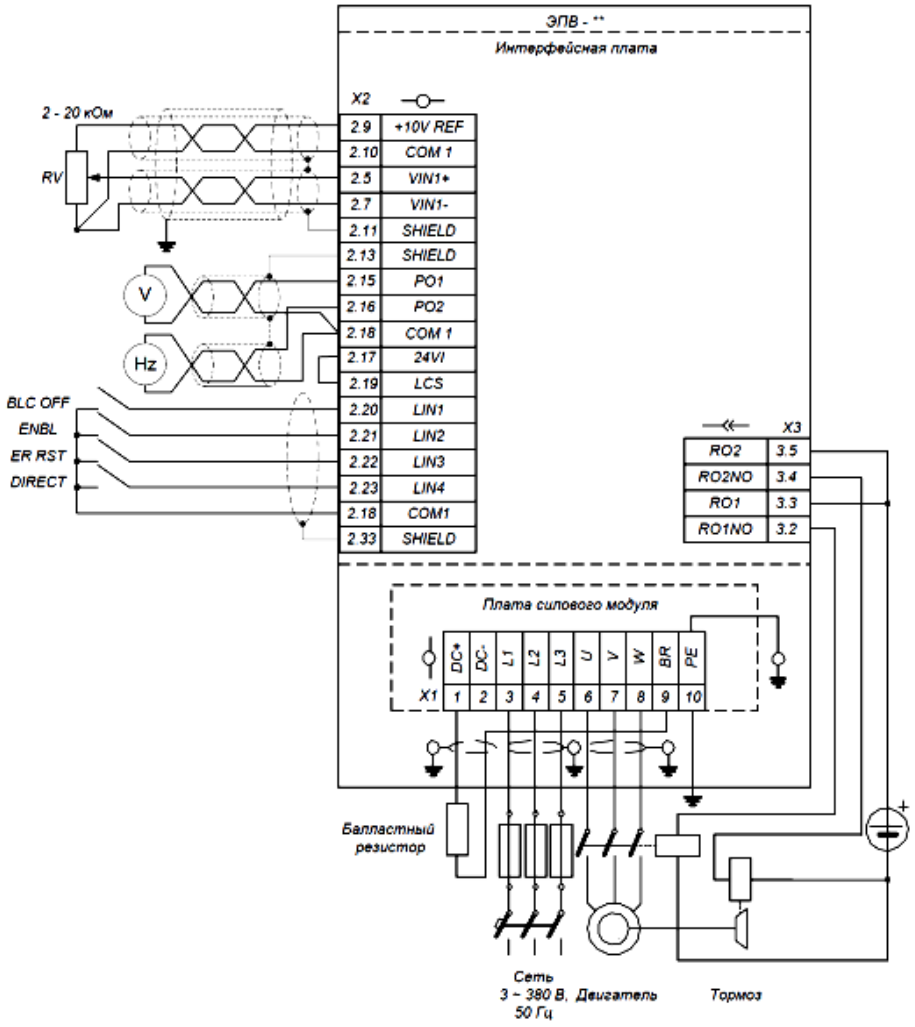


Рисунок 2.16 - Схема электрическая подключения

Перед началом электрического монтажа необходимо убедиться в пригодности двигателя для подключения к преобразователю частоты.

Необходимо учитывать, что выходное напряжение преобразователя на IGBT имеет форму импульсов с очень короткими фронтами (0,1…0,2 мкс) и амплитудой 1,35 напряжения питающей сети.

В зависимости от параметров кабеля напряжение на зажимах двигателя может удваиваться. Изоляция двигателя должна выдерживать повышенную нагрузку, при необходимости следует использовать фильтры *dU/dt*.

Подключение силовых цепей – питающей сети, двигателя и балластного резистора выполняют с помощью клеммника, расположенного на плате силового модуля (рисунок 2.17).

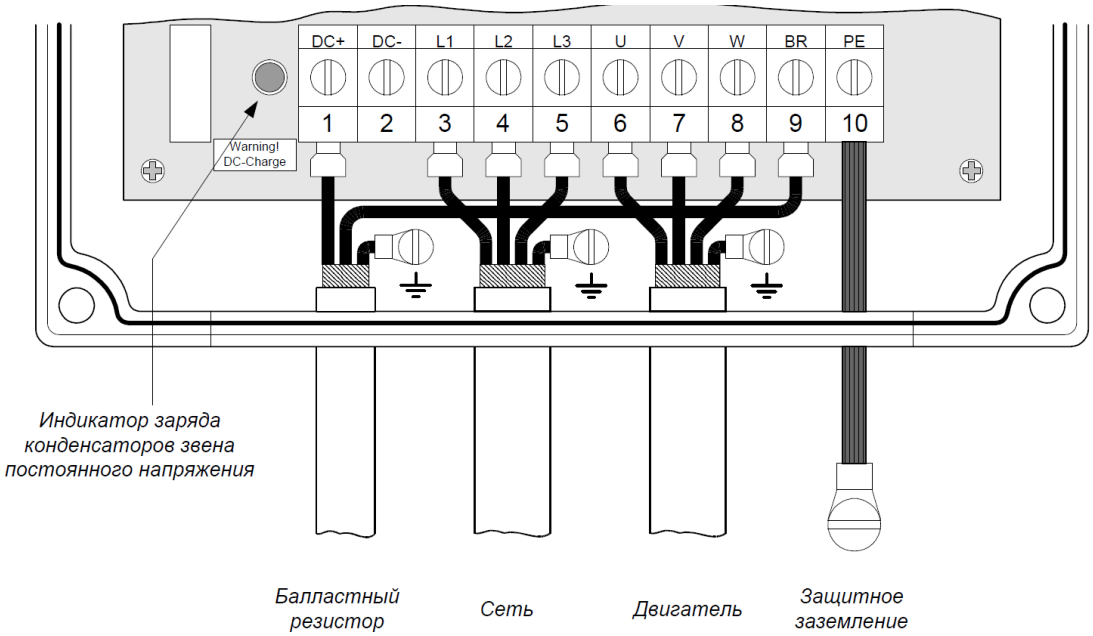


Рисунок 2.6 - Подключение силовых цепей

Подключение сети, двигателя и балластного резистора следует выполнять кабелями с изоляцией, соответствующей напряжению питающей сети и нагревостойкостью до 70 ºС. Подключение к сети выполняется через защитный автоматический выключатель и предохранители. Выбор предохранителей, сечение проводников кабелей рекомендуется выполнять согласно таблице 2.5 в соответствии с требованиями DIN VDE 0100.430.1 и действующих ГОСТ.

Таблица 2.5 – Номиналы предохранителей

Номинальный ток двигателя $I_М$, А	Номинал предохранителя	Сечение проводов подключения сети S, мм^2	Сечения проводов подключения двигателя S, мм^2
		клемы L1, L2, L3	клемы U, V, W
1,5 – 4,5	10 А	2,5	2,5
5,5 – 7,5	16 А	2,5	2,5 – 4,0
9 – 15	25 А	6,0	10,0 – 16,0
22 – 30	50 А	10,0	

Прокладка кабелей. При прокладке кабелей следует соблюдать следующие правила:

Кабель подключения двигателя нужно размещать по возможности отдельно от других кабелей иизбегать параллельной прокладки его с другими кабелями. При параллельной прокладке соблюдать минимальные расстояния между кабелями:

- 0.3 м - при длине кабеля до 50 м;

- 1 м - при длине кабеля до 200 м.

Максимальная длина кабеля подключения двигателя без фильтров и компенсирующих устройств не должна превышать:

- 200 м для условий типа N;

- 100 м - для типа I;

- 50 м - для типа C.

Кабели управления по возможности должны прокладываться отдельно от силовых.

Силовые кабели должны пересекать кабели управления под углом 90º как показано на рисунке 2.18.

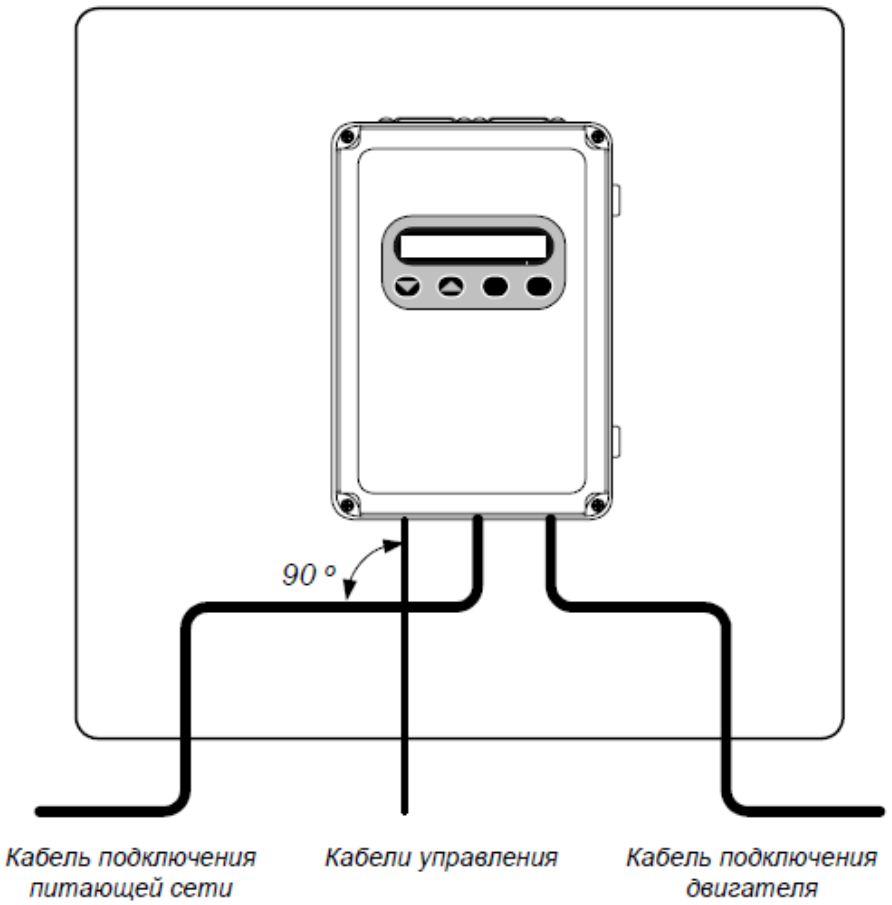


Рисунок 2.18 – Подключение кабелей к преобразователю

Релейные сигналы следует подключать витыми парами.

Запрещается подключать сигналы с напряжением до 24 В постоянного тока и 110/220 В переменного тока с помощью одного кабеля.

Низковольтные цифровые сигналы коммуникационных портов рекомендуется подключатькабелем с двойным экраном, но можно использовать и кабель с несколькими витыми парами в одном экране (рисунок 2.19, а).

Для подключения датчика скорости/положения рекомендуется кабель типа витая пара с двойным экраном (рисунок 2.19, б).

Каждый дифференциальный сигнал подключается отдельной экранированной парой.

Подключение выносного пульта ручного управления следует выполнять кабелем, оконцованным разъемами и проверенным в заводских условиях. Длина кабеля не должна превышать 1,5 м.

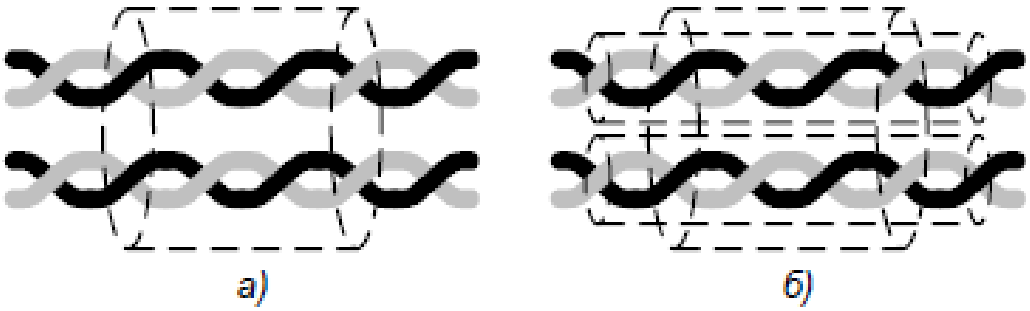
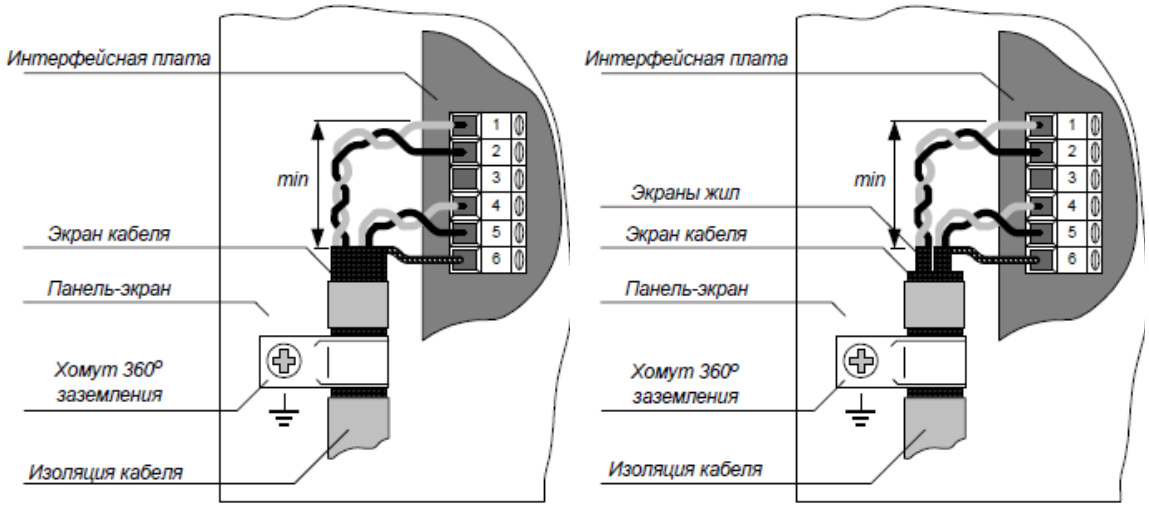


Рисунок 2.19 – Подключение сигнальных кабелей с одиночным (а) и двойным (б) экраном

Для кабелей, подключение которых выполняется через разъемы, помехозащищенность сигналов обеспечивается с помощью соединения экранов через отдельные выводы или корпуса разъемов с контуром интерфейсной платы, соединенным с заземленным шасси преобразователя.

Для максимальной помехозащищенности кабелей, подключаемых к клеммникам, следует обеспечить 360° заземление экрана как показано на рисунке 2.20.



а) б)

Рисунок 2.20 - Подключение экранированных кабелей

Таблица 2.6 – Рекомендуемое сечение защитного проводника

Номинальный ток преобразователя	Сечение защитного проводника S, не менее мм^2
5 – 16 А	2,5
25 – 50 А	4
63 – 100 А	6
100 – 125 А	16

Заземление преобразователя, двигателя и подключенного к ним оборудования выполняется для обеспечения безопасности персонала и снижения уровня электромагнитных помех. Сечение защитного проводника рекомендуется выбирать по таблице 5.3 или согласно DINVDE0160.

Исследование электропривода каротажной лебедки подтвердило правильность принятых в ВКР решениий. Применение асинхронного частотно-регулируемого электропривода с однозонной системой регулирования скорости обеспечивает удовлетворительные характеристики.

Время переходного процесса при пуске и торможении составляет в данном проекте на холостом ходу $t_{пп}$=0,25 с., при пуске с номинальной нагрузкой на валу двигателя - $t_{пп}$=0,4 с., что удовлетворяет предъявляемым требованиям.

Величина перерегулирования при управляющем воздействии, обычно допускается 7 % от установившегося значения частоты вращения в нижней части диапазона регулирования скорости. В разработанном электроприводе перерегулирование отсутствует.

Из графиков переходных процессов видно, что после наброса номинальной нагрузки появляется просадка скорости вращения двигателя, но через 0,2 с. частота вращения возвращается к заданному значению. Система по возмущающему воздействию является астатической, ошибка равна нулю.

Скорость подъема каротажного прибора в типовых режимах работы поддерживается в соответствии с техническими требованиями, колебания скорости подъема не превышают 5 % без датчика скорости [15, 19], при установке датчика отклонения скорости от заданной не превышают 1 %. Установка датчика положения (скорости) позволяет контролировать положение геодезического прибора в скважине.

Таким образом, можно сделать вывод, что асинхронный частотно-регулируемый электропривод с однозонной системой регулирования скорости имеет удовлетворительные технические характеристики и может быть использован при проектировании и модернизации каротажных лебедок.